修士論文

かなた望遠鏡
「可視赤外線同時撮像カメラ」の開発

広島大学大学院 理学研究科 物理科学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室
M074844
宮本久嗣
主査：山下卓也　副査：佐藤仁

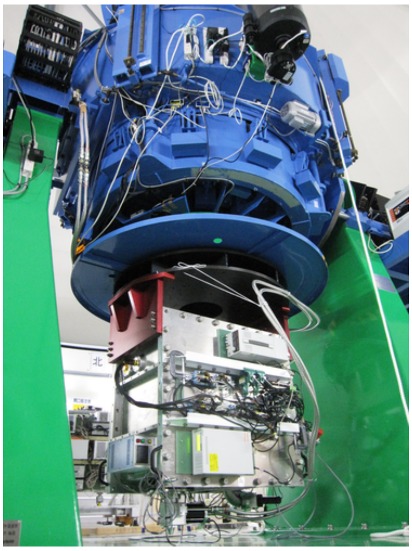
2009年2月10日

概 要

太陽系外惑星 (系外惑星) の直接検出の方法の 1 つに、観測者の視線方向に対して惑星が主星の裏側に隠れる二次惑星食による惑星熱輻射成分の減光の検出がある。ただし、2.2 μm の近赤外線領域においてこの減光は 0.1 %程度以下と考えられており高感度・高精度な観測が要求されるため、現在までのところ地上望遠鏡による有意な観測例は報告されていない。私は、広島大学「かなた」望遠鏡カセグレン焦点専用観測装置として現在開発中の「可視赤外線同時撮像カメラ」による系外惑星熱輻射直接検出の可能性を探るため、現在カセグレン焦点に搭載されている名古屋大学で開発された装置 TRISPEC を用いて主星の表面を惑星が遮蔽する一次星食の観測を行った。結果、2.2 μm 領域で 1.7 %程度の減光現象を確認し、S/N はおよそ 100 であることが分かった。TRISPEC の問題点は、フォーマットの小さい検出器とデータ転送時間のかかる読み出しシステムを用いていることから、上記の S/N が限界となった。これらの結果をもとに、「可視赤外線同時撮像カメラ」による系外惑星からの熱輻射直接検出を視野に入れた開発を行った。

「可視赤外線同時撮像カメラ」は、近赤外線検出器としては最大フォーマットの 2048×2048 画素数を有した米 Raytheon 社製検出器「VIRGO-2K」と、読み出しシステムとして国立天文台で開発された最新システム MESSIA5 を用いるため、2.2 μm 領域におけるスカイノイズや検出器の読み出しノイズ等を考慮した場合の感度は、TRISPEC と比較して計算上 4 倍以上になり、さらに観測効率を考えると 10 倍程度まで向上する。このため、系外惑星からの熱輻射の直接検出が可能であると考えられる。本研究における最終目標は、私が開発した「可視赤外線同時撮像カメラ」を用いて 0.1 %の測光精度を達成することである。現在までに、検出器系の立ち上げおよび性能評価、シャッターやモータ等の制御系の開発、ホイール等各種部品の組み上げ、真空槽の温度モニタリングシステムおよびコントロールシステムの開発と真空槽の性能評価を行った。

「可視赤外線同時撮像カメラ」開発の 1 つ目として、近赤外線検出器「VIRGO-2K」の立ち上げおよびテスト用デュワーを用いた最適駆動温度 80 K での性能評価を行った。結果、1 画素において 130 ke$^-$ まで 1 %未満の線形性を保つことが分かり、TRISPEC に対して 2 倍以上の S/N を稼げるため、目指すサイエンスに有利であることが分かった。また、読み出しノイズはおよそ 24 e$^-$ を達成し、撮像観測に問題のないレベルであることが分かった。開発の 2 つ目として、光学素子交換機構制御、シャッター制御等の制御系の開発を行った。光学素子交換機構として、ステッピングモータによるホイール駆動機構を用いており、モータドライバ Motionnet にプログラムを組むことでホイール駆動制御系の開発を行い、さらにソケット通信による遠隔制御システムも開発した。そして開発の 3 つ目として「可視赤外線同時撮像カメラ」用真空槽の性能評価およびシリアル通信による温度モニタリングおよびコントロールシステムを開発し、真空槽に検出器を投入した状態での温度制御を確認した。そして、真空槽にホイール、レンズ系、ダイクロイックミラー、検出器などすべてのコンポーネントを入れた状態での真空冷却試験を行った結果、冷却温度は目標値である 80 K 以下を達成した。そして 2009 年 2 月 6 日に、「かなた」望遠鏡に搭載してのファーストライトを迎えることができた。



可視赤外線同時撮像カメラ

目 次

第 I 部 「TRISPEC」を用いた
トランジット法による系外惑星の試験観測 **8**

第 1 章 序論 **9**
1.1 太陽系外惑星 9
1.2 「かなた」望遠鏡と観測装置 10
1.2.1 東広島天文台と 1.5m 光学赤外線望遠鏡「かなた」 10
1.2.2 観測装置 11

第 2 章 太陽系外惑星 **14**
2.1 トランジット法 14
2.2 大気構造モデル 15
2.3 近赤外線領域の意義 16
2.4 系外惑星の統計的な議論 17

第 3 章 「TRISPEC」を用いた系外惑星試験観測 **19**
3.1 観測ターゲット・観測法 19
3.2 解析手順 21
3.2.1 一次処理 21
3.2.2 Aperture 測光 23
3.3 解析結果と考察 24
3.4 「可視赤外線カメラ」の感度の算出 26

第 II 部 可視赤外線同時撮像カメラの開発 **27**

第 4 章 可視赤外線カメラ **28**
4.1 地上望遠鏡の可視赤外線観測装置 28
4.2 可視赤外線カメラの特徴 29
4.3 可視赤外線カメラの光学系 29
4.4 用いる検出器 32
4.4.1 近赤外線検出器 VIRGO-2K 32
4.4.2 完全空乏型 CCD 34
4.5 検出器制御システム 35
4.5.1 デジタル回路「Messia5」 35
4.5.2 近赤外線検出器専用アナログ回路「MACS2」 37
4.5.3 完全空乏型 CCD 専用アナログ回路「MFront2」 38
4.6 本研究の目的 39

第 5 章　各種制御系の開発 **40**
5.1 統合制御概略 40
5.2 ホイール制御概略 40
5.2.1 ホイールとステッピングモータ 40
5.2.2 モータ制御システムの開発 43
5.3 シャッター制御 48
5.3.1 AVR マイコンと開発したシャッタードライバ 48
5.3.2 USART を利用したシリアル通信制御 49
5.3.3 割り込みを利用した露出中断機能の実装 49
5.4 制御系の問題点 51
5.4.1 ホイール 51
5.4.2 シャッター 51

第 6 章　光学系の調整および真空槽を用いた各種性能評価試験 **52**
6.1 「可視赤外線カメラ」に用いる真空冷却システム 52
6.1.1 要求性能 52
6.2 温度モニターと温度制御システムの構築 54
6.3 レンズの偏心調整 56
6.3.1 レンズの特性:偏心・傾き 56
6.3.2 冷却によるレンズおよび鏡筒の収縮 56
6.3.3 オートコリメータを用いたレンズの偏心調整 58
6.4 真空冷却試験 60

第 7 章　ファーストライト **62**
7.1 「かなた」望遠鏡への搭載 62
7.2 結像性能 64
7.3 標準星 HIP43587 を用いた効率の評価 65

第 8 章　実験室および「かなた」望遠鏡搭載時の検出器の性能比較 **66**
8.1 VIRGO-2K の制御方法 66
8.1.1 VIRGO-2K のクロックパターンとクロック作成 66
8.1.2 残像と対策用クロック 68
8.2 実験室における VIRGO-2K の性能評価試験 69
8.2.1 テスト用デュワー 69
8.2.2 コンバージョンファクタと読み出しノイズ 70
8.2.3 リニアリティ 72
8.2.4 Fowler Sampling による読み出しノイズの測定 72
8.2.5 ダーク 75
8.3 「かなた」望遠鏡搭載時の VIRGO-2K の性能評価 76
8.3.1 コンバージョンファクタと読み出しノイズ 76
8.3.2 リニアリティ 76
8.3.3 Fowler Sampling による読み出しノイズの測定 77
8.3.4 ダーク 79

第 9 章　まとめと今後 **80**

付 録 A 近赤外線検出器の構造 **81**
A.1 赤外線の検知と暗電流 81
A.2 検出法 81
A.3 Source Follower per Detector 82
A.4 マルチプレクサ (MUX) 83
A.5 近赤外線検出器の構造 84
A.6 VIRGO-2K の集積回路 85

付 録 B VIRGO-2K 用クロックパターン **86**
B.1 cpg.ascii 86
B.1.1 リセット用クロック 86
B.1.2 読み出し用クロック 87
B.1.3 残像対策用クロック 88
B.2 spv.ascii 89

付 録 C シャッタードライバ用 AVR プログラム **90**
C.1 ソースプログラム 90

付 録 D 各種レンズの偏心測定 **93**

付 録 E 浜松ホトニクスで開発中の検出器 **104**
E.1 cpg.ascii 105
E.2 spv.ascii 108

表 目 次

1.1 かなたの主な諸元 10
1.2 TRISPEC の仕様 11
1.3 HOWPol の仕様 12
1.4 高速分光器の仕様 13

4.1 主な検出素子の最適温度と装置内部の最適温度 28
4.2 仕様比較表 30
4.3 各ホイールに用いる光学素子 31
4.4 VIRGO-2K の仕様 33
4.5 完全空乏型 CCD の仕様 34

D.1 レンズ偏心測定値 (コリメータレンズ) 93
D.2 レンズ偏心測定値 (赤外線カメラレンズ) 93
D.3 レンズ偏心測定値 (可視カメラレンズ) 93

図 目 次

1.1 トランジット法による系外惑星 HD209458b の観測例。Charbonneau et al.[2] . . . 9
1.2 1.5m 光学赤外線望遠鏡「かなた」 10
1.3 可視赤外線同時撮像分光器「TRISPEC」 11
1.4 1 露出型偏光撮像装置「HOWPol」 12
1.5 高速分光器 13

2.1 Spitzer、IRAC を用いた系外惑星の熱輻射の検出例 (Charbonneau et al. [6]) . . . 14
2.2 Secondary elipse 時の赤外線域での主星に対する惑星のフラックス比 (Burrows et al. [11]) 15
2.3 一次星食と二次惑星食 (Rowe et al. [8]) 16
2.4 UKIRT,UIST を用いた HD209456b の観測例 (Snellen [18]) 17
2.5 惑星質量と入射フラックスの関係 (Fortney et al. [19]) 18

3.1 TrES-1 と比較星の画像 (R バンド) 19
3.2 ディザリングごとの TrES-1 の画像 (R バンド) 20
3.3 左:生画像、右:一次処理後 (上から、R、J、Ks バンド) 22
3.4 Aperture の切り方の例 (21 分割) 23
3.5 TrES-1 の光度曲線 (上:R バンド、中:J バンド、下:Ks バンド) 25

4.1 電磁波の地球大気の透過率 28
4.2 可視赤外線カメラの光学系 30
4.3 VIRGO-2K 32
4.4 VIRGO-2K(mudule49) の量子効率 33
4.5 完全空乏型 CCD 34
4.6 完全空乏型 CCD の量子効率 35
4.7 Messia5(上:DSP ボード、下:CMC) 35
4.8 Messia5 の構成 36
4.9 MACS2 37
4.10 MACS2 プリアンプ 38
4.11 MFront2 38

5.1 「可視赤外線カメラ」の制御系統括図 41
5.2 ホイールと構造を示した図 42
5.3 位置検出スイッチ 42
5.4 原点検出スイッチ (左:赤外線ホイール、右:その他のホイール) 42
5.5 ステッピングモータ 43
5.6 冷却駆動用ボールベアリング 43
5.7 センターボードとローカル・1 軸ステッピングモータドライバ 43

5.8 マルチドロップ接続 44
5.9 プログラムの全体の流れ 45
5.10 S 字加減速 46
5.11 開発したソケット通信の流れ 47
5.12 AVR ATmega8 48
5.13 作成したシャッターボード 48
5.14 USART のブロック図 50
5.15 シャッタードライバからの電圧信号の図 51

6.1 「可視赤外線カメラ」の真空槽 52
6.2 シールドをインシュレータで覆っている様子 53
6.3 真空槽の真空冷却試験 (内容物はモーター 1 つのみ) 53
6.4 左:温度モニター Lakeshore218、右:温度コントローラ Lakeshore331 54
6.5 白金抵抗 100 Ω および 1000 Ω 55
6.6 検出器ケースに配線した白金抵抗とヒーターの様子 (左:VIRGO-2K、右:CCD) . . 55
6.7 時間-温度グラフ (左:VIRGO-2K、右:CCD) 56
6.8 時間-温度勾配グラフ (左:VIRGO-2K、右:CCD) 56
6.9 右:「可視赤外線カメラ」に用いるレンズの例、左:レンズの傾きと偏心 57
6.10 冷却による鏡筒の収縮方向 57
6.11 レンズの固定ネジの位置 57
6.12 オートコリメータによるレンズの偏心調整の様子 58
6.13 レンズ偏心測定法 58
6.14 鏡筒に挿入したレンズ 59
6.15 真空槽にすべてのコンポーネントを入れた様子 60
6.16 真空冷却試験 61
6.17 バルブを閉じた状態で真空保持試験 61

7.1 「可視赤外線カメラ」を「かなた」に搭載した様子 62
7.2 「可視赤外線カメラ」で撮ったオリオン大星雲 63
7.3 最良星像サイズの例 64
7.4 シリウスをぼかしたときの画像 64
7.5 ひとみホイールの影響がない画像 64
7.6 標準星 HIP43587 65
7.7 コリメータ+IR カメラの透過率 65

8.1 4 出力モードのクロックパターン 67
8.2 実際に送っているクロックの様子 67
8.3 VIRGO-2K モジュール 49 の残像パターン (対策前) 68
8.4 時間と残像レベルのグラフ (対策前) 68
8.5 VIRGO-2K の試験に用いたデュワー 69
8.6 デュワー内に置いた VIRGO-2K の様子と試験に用いた光源 69
8.7 試験全体像 70
8.8 検出器に光源を当てた時のイメージ 71
8.9 出力信号と分散の関係 71
8.10 左:露出時間-検出器出力カウント、右:検出器出力カウント-リニアリティ 72

8.11 Correlated Doubles Sampling 73
8.12 Fowler Sampling 73
8.13 ダークイメージ 74
8.14 Fowler Sampling 74
8.15 露出時間とダークの関係 75
8.16 フラット板 76
8.17 フラット板から得られた画像 76
8.18 出力信号と分散の関係 77
8.19 左:露出時間-検出器出力カウント、右:検出器出力カウント-リニアリティ 77
8.20 ダークイメージ 78
8.21 Fowler Sampling 78
8.22 露出時間とダークの関係 79

A.1 逆バイアスによる空乏層での電子・ホールの移動 82
A.2 読み出し回路 82
A.3 MUX の構造例 83
A.4 近赤外線検出器の概略図 84
A.5 検出部と読み出し素子の構成 85
A.6 読み出し出力部の構造 85

D.1 コリメータレンズ群 (G2,G3) 94
D.2 コリメータレンズ群 (G4,G5) 95
D.3 コリメータレンズ群 (G6,G7) 96
D.4 コリメータレンズ群 (G8) 97
D.5 赤外線カメラレンズ群 (G11,G12) 98
D.6 赤外線カメラレンズ群 (G13,G14) 99
D.7 赤外線カメラレンズ群 (G15) 100
D.8 可視カメラレンズ群 (G16,G17) 101
D.9 可視カメラレンズ群 (G18,G19) 102
D.10 可視カメラレンズ群 (G20) 103

E.1 64×64 フォーマットマルチプレクサ 104
E.2 クロック波形 104

第I部

「TRISPEC」を用いた
トランジット法による系外惑星の試験観測

第1章　序論

1.1　太陽系外惑星

1995 年に主系列星ペガサス座 51 番星で惑星 51Peg b が発見されて以来、この 13 年間で 300 個以上の太陽系外惑星 (系外惑星) が観測されてきた。51Peg b は視線速度法により発見された。視線速度法とは、主星と惑星が共通重心の回りを運動していることにより主星の公転運動の視線速度方向の変化を検出することで付随する惑星を探索する方法で、ホットジュピターなど我々の太陽系とは異なる形態の数多くの系外惑星が発見されてきた。しかし、この方法では惑星の質量の下限値しか求めることができなかった。その後、2000 年に HD209458 で視線方向に対して主星の前を惑星が通過することによる食が測光観測で初めて観測された (図 1.1)。この方法はトランジット法と呼ばれるもので、画期的なことにデータから惑星の軌道傾斜角や半径そして視線速度法と組み合わせることで正確な質量と半径を推定することができ、そこから密度まで求めることができる。現在トランジット法による観測天体数は 50 以上にも上り、発見のみならず個々の惑星についての詳細な解明もされ始めてきている。

トランジット法の大きな特徴は、アマチュア天文家による観測も可能なことが挙げられる。実際、市販の装置で mmag レベルの測光精度を達成しており、系外惑星の発見や性質の解明に大きく寄与している。そのような中、専門家の間ではトランジット法による系外惑星のより詳細な解明のためには 1mmag 以上のより高い測光精度が要求され始めており、高測光精度観測が現在も押し進められている。この高測光精度観測の研究例として、系外惑星の大気構造の解明が挙げられる。

系外惑星の大気構造は、惑星の黒体放射、主星からの入射光エネルギーに対する反射光エネルギーの比であるアルベド、分子による吸収、惑星の昼側から夜側に熱が流入する割合、成層圏の有無などでスペクトルモデルが決まる。しかし、このモデルは縮退しており、ほとんどの系外惑星についてはっきりとした大気構造が分かっていない。この縮退を解く方法の 1 つとして、2.2 μm 領域での 1mmag 以上の高精度トランジット観測による二次惑星食を利用した系外惑星からの熱輻射直接検出がある。もしこの熱輻射を有意に検出できれば、スペクトルモデルの縮退が解け、惑星の大気構造を解明することができ、大気構造の研究が大幅に躍進すると考えられる。

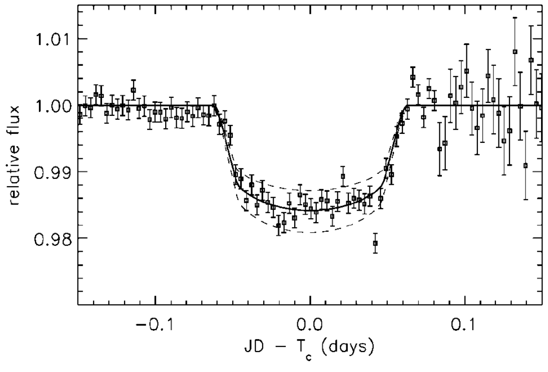


図 1.1: トランジット法による系外惑星 HD209458b の観測例。Charbonneau et al.[2]

1.2 「かなた」望遠鏡と観測装置

1.2.1 東広島天文台と 1.5m 光学赤外線望遠鏡「かなた」

東広島天文台は、広島大学東広島キャンパスから車でおよそ 20 分のほど近い場所に建設された広島大学の研究施設である。この天文台では、2006 年に国立天文台から東広島天文台へ移設された赤外シミュレータ (後に「かなた」と命名、図 1.2) を主力装置として研究活動を行っている。この望遠鏡で狙う研究テーマは、ガンマ線バースト (GRB) などの突発天体の即時観測による高エネルギー宇宙現象の解明である。そのため、方位速度 5 度/秒、高度速度 2 度/秒という速い駆動速度を有している。表 1.1 に「かなた」望遠鏡の諸元を示す。「かなた」望遠鏡には現在 3 つの観測装置が搭載されている。次節から、それぞれの装置について説明する。

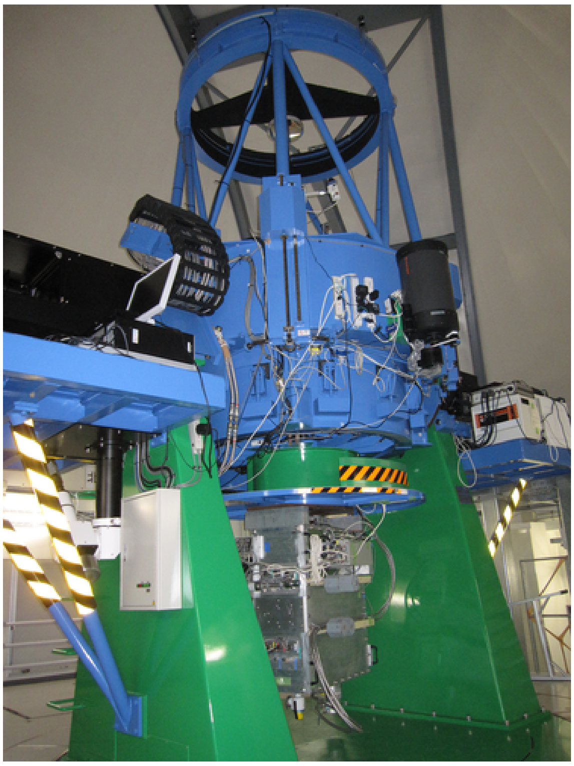


図 1.2: 1.5m 光学赤外線望遠鏡「かなた」

表 1.1: かなたの主な諸元

光学系	リッチー・クレティアン光学系
主鏡径	有効径 1540 mm
主鏡材	ULE (超低膨張ガラス) 983 kg
合成 F 値	F=12.2 (焦点距離 f=18300 mm)
視野	15 分角
駆動方式	経緯台 (トルク・モーターによるフリクションドライブ)
駆動速度	5 度/秒 (方位)、2 度/秒 (高度)
総重量	約 17 トン
搭載可能重量	500 kg(カセグレン焦点)、1000 kg(ナスミス焦点)

1.2.2　観測装置

可視赤外線同時撮像分光装置「TRISPEC」

かなた望遠鏡のカセグレン焦点には、可視赤外線同時撮像分光装置「TRISPEC」という名古屋大学で開発された装置が現在搭載されている。この装置は、「かなた」の主力装置として用いられており、ブレーザーやガンマ線バースト、矮新星など様々な変動天体の解明に寄与している。この装置の特徴は、2 枚のダイクロイックミラーを用いて、0.45-0.9 μm、0.9-1.85μm、1.85-2.5 μm の 3 つの波長域に分割することで、3 波長域同時撮像・分光、偏光観測を行うことができることが挙げられる。可視検出器は、512×512 フォーマットの SiTe 検出器を、近赤外線検出器は 256×256 フォーマットの InSb 検出器を用いている。図 1.3 に TRISPEC の写真を、表 1.2 に TRISPEC の仕様を示す。

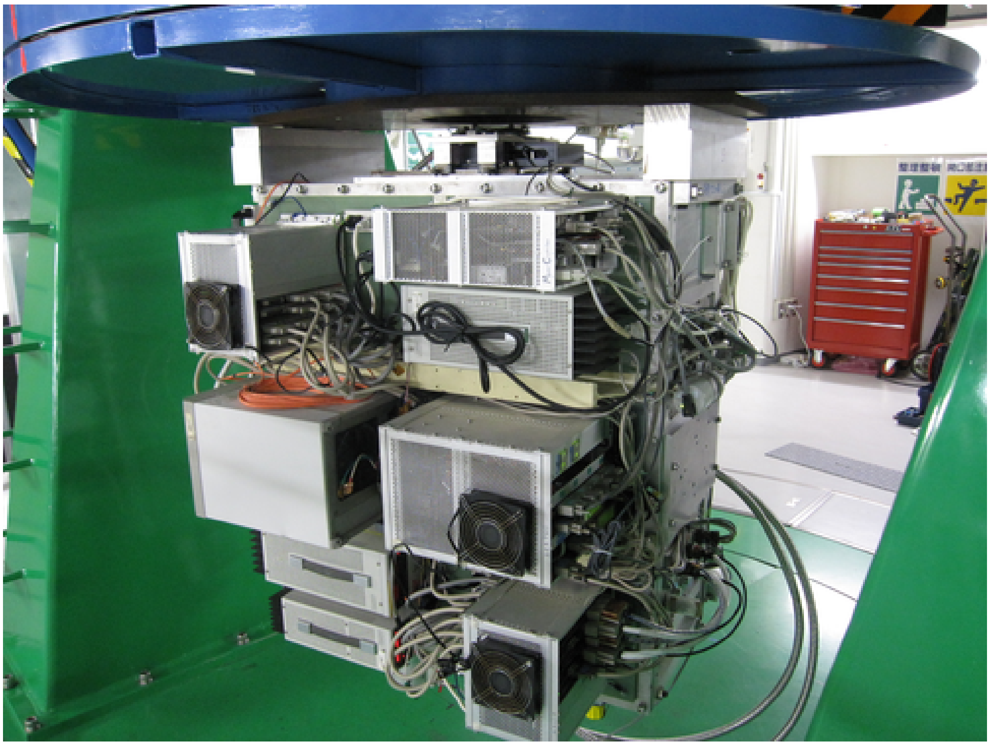


図 1.3: 可視赤外線同時撮像分光器「TRISPEC」

表 1.2: TRISPEC の仕様

	OPT	IR1	IR2
Detector	CCD(512×512)	InSb(256×256)	InSb(256×256)
FOV	7.0 ’×7.0 ’	7.0 ’×7.0 ’	7.0 ’×7.0 ’
Pixel scale	0.82 ”/pixel	1.65 ”/pixel	1.65 "/pixel
Filters	B, V, R, I	J, H	Ks, K, H_2

1 露出型偏光撮像装置「HOWPol」

かなた望遠鏡の第 1 ナスミス焦点には、広島大学宇宙科学センタが独自に開発した 1 露出型偏光撮像装置「HOWPol」が常設されている。この装置は、1 回の露出で直線偏光パラメータの導出が可能な偏光素子を用いている。モードとしては、広視野撮像モードのほかに、偏光撮像 (広視野型と狭視野型)、分光、偏光分光のモードを搭載している。CCD は浜松ホトニクスで開発された完全空乏型 CCD を用いている。図 1.4 に HOWPol の写真を、表 1.3 に HOWPol の仕様を載せる。

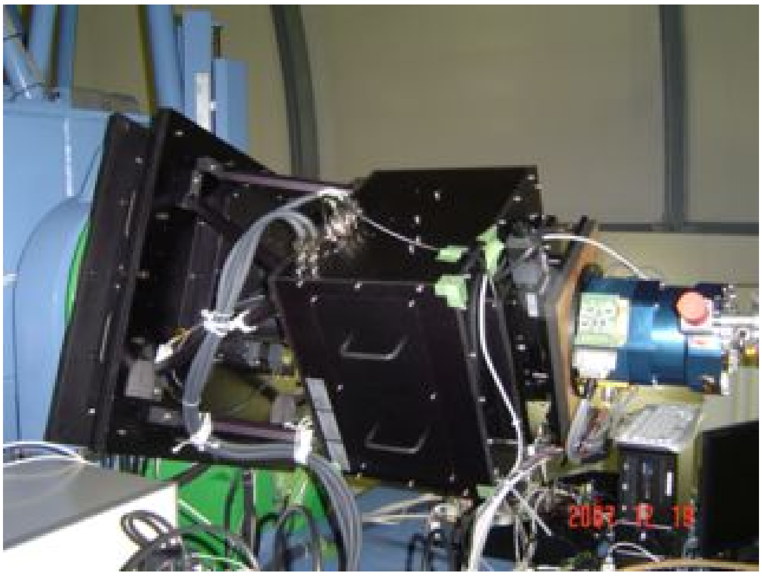


図 1.4: 1 露出型偏光撮像装置「HOWPol」

表 1.3: HOWPol の仕様

Wavelength	0.45-1.1 μm
FOV	Imaging: 15 '× 15 ' Impol(wide):7 '× 7 ' impol(narrow):15'×1 ' Spectroscopy:2.3 '' × 15 ' Spectropol:2.3 '' × 1 '
Filter	B,V,R,I,z',H-alpha
Grism	Low-res(474 /mm,R=610),High-res(1579 /mm,R=2300)
Wollaston prism	(Both) Wedged double Wollaston prism (Wide) Made of six calcite blocks (Narrow) Six magnesium fluoride blocks and two fused silica wedges

高速分光器

高速分光器は、「かなた」望遠鏡の第 2 ナスミス焦点常設装置として、広島大学と京都大学が共同で開発した装置である。この装置は、高速読み出しが可能な CCD カメラを用いることで最高 35.8 frame/sec の撮像・分光観測を可能にしている。この装置は、2008 年 5 月に分光器を備えた状態でのファーストライトを迎え、2009 年 2 月現在はソフトウェアも完成し、ほぼ観測できる体制が整っている。図 1.5 に高速分光器の写真を、表 1.4 に仕様を載せる。

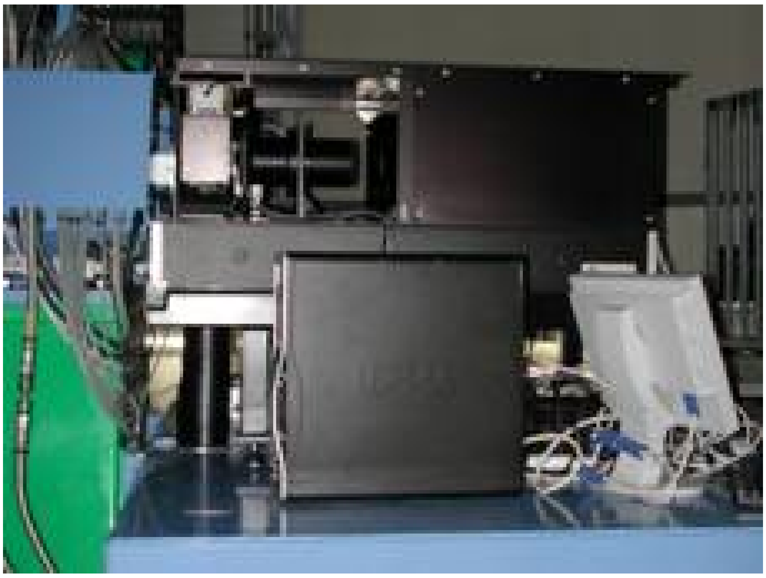


図 1.5: 高速分光器

表 1.4: 高速分光器の仕様

Pixel format	512 × 512
Pixel size	16 micron × 16 micron
FOV	4 ’ × 4 ’
Frame rate	Maximum 35.8 frames/sec (no binning)
Exposure time	Minimum 27.1 msec to maximum 10 sec
Spectrograph	Grism:430-690 nm(R=150)、Prism:400-800 nm(R=9-73)

第2章　太陽系外惑星

2.1　トランジット法

太陽系外惑星 (系外惑星) の観測方法の 1 つに、トランジット法というものがある。これは、視線方向に対して主星の表面を惑星が遮蔽することによる一次星食現象を測光観測によって捕らえる方法である。系外惑星は 1995 年の発見以来、2009 年 2 月現在までに 339 個 ([4]) が発見されているが、そのうちトランジット天体は 56 個が確認されており、視線速度法に次いで数多く発見されている方法である。トランジット法は、視線方向と惑星の軌道のなす角度 (軌道傾斜角) に依存した手法であるため観測例はまだ少ないものの、軌道傾斜角の不定性がないため惑星の質量や直径、密度を正確に求まることができ、惑星の種類まで正確に特定できるため、系外惑星の観測の重要な手法の 1 つとなっている。

トランジット法により発見された系外惑星のタイプの多くは、ホットジュピターと呼ばれる天体である。この天体は、木星質量程度のガス惑星であり、主星の回りを数日周期という短期間周期で公転しているという特徴を有している。このような系は、我々の太陽系から見ると非常に特異なシステムである。ただ、現在の観測装置の性能が系外惑星の発見に制限をかけていることは明白であり、この十数年はむしろバイアスがかかった発見だったともいえる。現在では、太陽サイズの恒星系に限らず、M 型星の回りの地球型惑星の発見の試みなどがされており、トランジット法は今後も注目されている。

またここ近年、系外惑星は発見だけにとどまらず各々の惑星の性質の解明も頻繁にされ始めている。その 1 つが、大気構造の解明である。実際、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) を用いて、食を起こしているときと起こしていないときの HD209458b の分光スペクトルを比較することで、大気中のナトリウムによる吸収線が検出された例がある ([5])。この他にも、スピッツァー宇宙望遠鏡 (Spitzer) による赤外線域の系外惑星からの熱輻射の検出もされており (図 2.2)、より詳細な大気の解明が試みられている。次節では、系外惑星の大気構造について述べる。

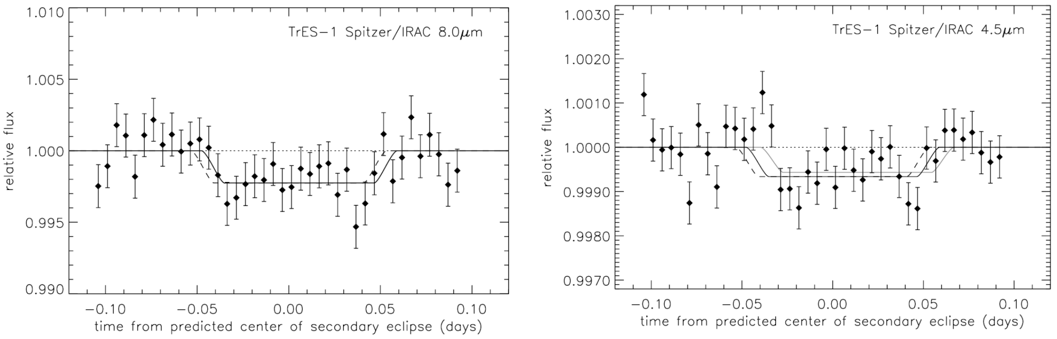


図 2.1: Spitzer、IRAC を用いた系外惑星の熱輻射の検出例 (Charbonneau et al. [6])

2.2 大気構造モデル

ホットジュピターの大気物理は、ここ数年の間に多くのモデルが報告されてきた([7],[8],[9],[10],[11] など)。論文によると、ホットジュピターの大気構造は主に、惑星の黒体放射、大気内の分子の吸収、主星からの入射光エネルギーに対する反射光エネルギーの比であるアルベド、惑星の昼側から夜側への熱の流入量、成層圏の有無がホットジュピターのスペクトルに大きく寄与する。惑星の大気構造のスペクトルモデルの例として、図 2.2 に Burrows らにより提唱された赤外線域における系外惑星 HD209458b とその主星のフラックス比を載せる ([11])。各グラフはホットジュピターの昼側と夜側の熱流入比を表した P_n([12]) と、成層圏の有無による光学的厚さ $\tau^{opt.}_{extra}$ の各々のパラメータを変化させた場合についてスペクトルをシミュレートしたものである。スペクトルは、基本は惑星の黒体輻射をもとにし水蒸気の吸収成分などを考慮したものとなっているが、TiO と VO で構成される成層圏があると想定した場合は、ないと想定したものより、中間赤外線域でフラックスが高くなっていることが分かる。これは、主星からの入射光が TiO と VO で吸収されることで熱構造の逆転が生じ中間赤外線域で強い輻射が生じることによるものである。つまり、惑星の大気構造のなかでも成層圏の有無はスペクトルに大きな変化を及ぼすことが分かる。しかし、現在までのところ、Richardson et al.(2007) の Spitzer の IRS によるスペクトルと、Deming et al.(2005) の Spitzer の MIPS による 24 μm のデータと、Knutson et al.(2008) の Spitzer の IRAC による 3.6、4.5、5.8、8.0 μm のデータと、スペクトルモデルとの間からははっきりしたが解答が得られていないことが分かる。

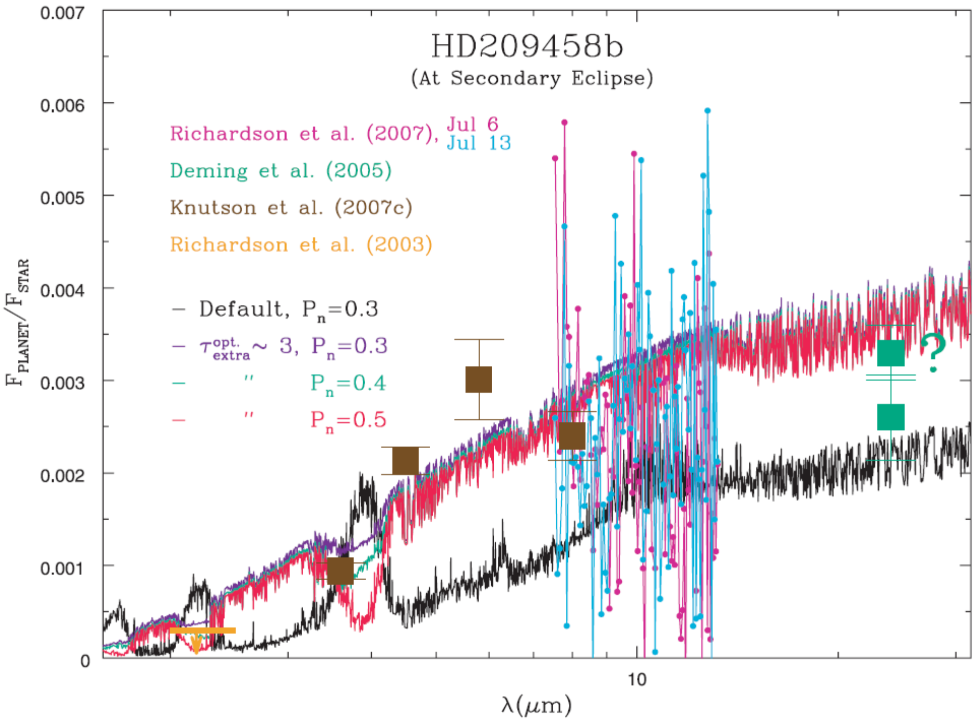


図 2.2: Secondary elipse 時の赤外線域での主星に対する惑星のフラックス比 (Burrows et al. [11])

2.3 近赤外線領域の意義

前節で述べたように、Spitzer をもってしてもホットジュピターの大気構造の完全な理解は得られておらず、モデルは縮退しているのが現状である。この縮退を解く方法として、1 つに 2.2 μm 近赤外線領域でのホットジュピターからの熱輻射の検出がある。図 2.2 の 2.2 μm 付近を見ると成層圏がある場合とない場合とでは、フラックス比が大きく異なることが分かる。もし仮に、2.2 μm 領域で検出された場合成層圏がないことが決定でき、現在のモデルの縮退が解けることを意味する。よって、ホットジュピターの大気構造の解明のためには近赤外線領域の惑星輻射成分の情報が重要となる。

大気構造解明のための要求される情報は、惑星と主星のフラックス比である。この情報を得る方法として、視線方向に対して惑星が主星の裏側に隠れることによる二次惑星食 (secondary eclipse) の検出がある (図 2.3)。この検出のためには、スペクトルモデルから主星と惑星のフラックス比 0.1 %という高精度なデータが要求されることが分かる。このような精度を達成しようとなると、宇宙観測が好条件となる。ただ、現在稼働中の宇宙望遠鏡の中で近赤外線観測装置を搭載している衛星は「あかり」だけであるが、「あかり」はサーベイに特化した衛星であるため、系外惑星の観測には向いていない。となると地上観測しか方法がなくなるが、近赤外線観測装置を搭載した望遠鏡による有意な観測例は残念ながら報告されていない。図 2.4 に UKIRT の UIST を用いた HD209458b の観測例を示す。有意に受かっていないことが分かる。

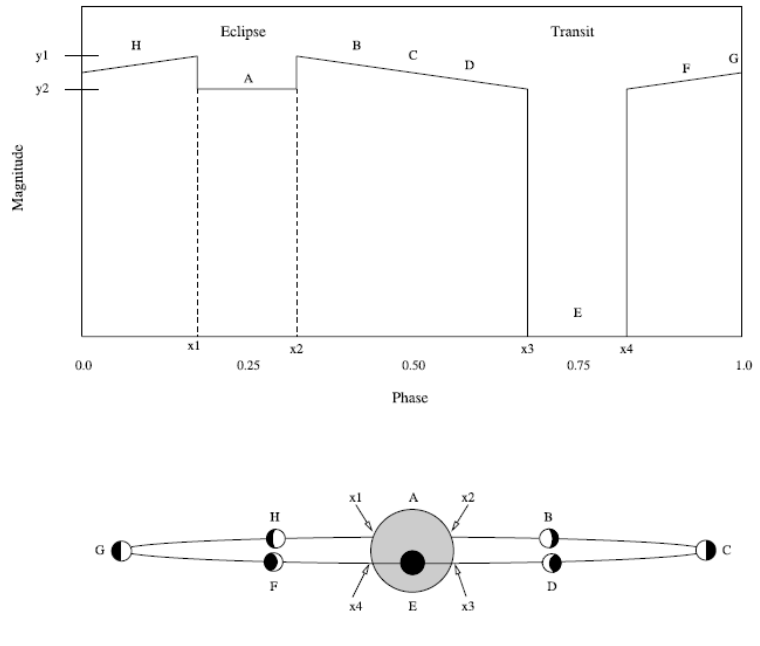


図 2.3: 一次星食と二次惑星食 (Rowe et al. [8])

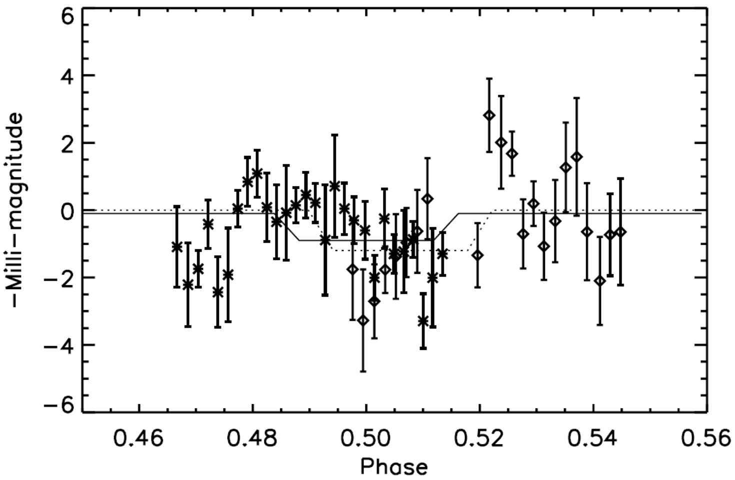


図 2.4: UKIRT,UIST を用いた HD209456b の観測例 (Snellen [18])

2.4 系外惑星の統計的な議論

近赤外線領域における系外惑星の熱輻射の有意な直接検出例がない現状でも、Spitzer により多くの二次惑星食が検出され続けているため、中には成層圏が存在が強く示唆される惑星もある。そのため、そのような結果を踏まえたうえで、1 つの系外惑星の解明のみならず統計的な議論もされ始めている。その例の 1 つに、主星からの入射フラックス量による成層圏の有無の分類がある (図 2.5)。この分類では、入射フラックス 10^9 erg/s/cm^{-2} 付近を境に pM Class と pL Class というものに分けている。pM Class は、成層圏があると予想される惑星で、pL Class は成層圏がないと予想される惑星である。ただし、図 2.5 の中の XO-1b は成層圏の存在が強く示唆されており、TrES-1 や HD189633b は成層圏がないことが示唆されており、これらが同じ pL Class に存在していることから、この分類の信憑性はまだはっきりと分かっていない。このような議論の中に、近赤外線領域の有意なデータがあるとより深い議論ができる。その意味でも、地上望遠鏡による 2.2 μm 領域の二次惑星食の検出は非常に価値があることが分かる。

東広島天文台でも、「かなた」望遠鏡カセグレン焦点搭載装置「TRISPEC」用いたトランジット法の試験観測を行った。次章では、その試験観測について述べる。

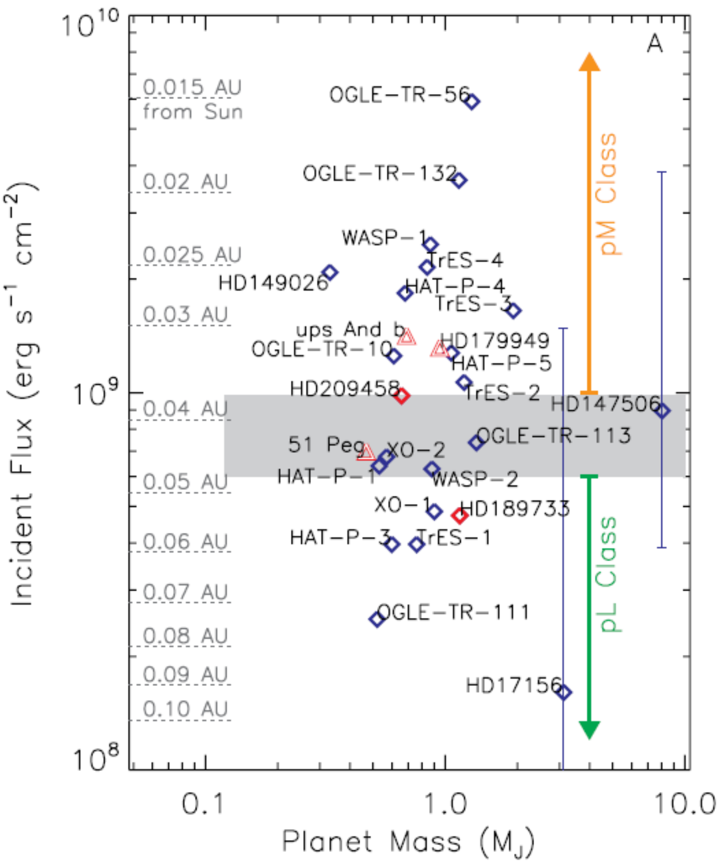


図 2.5: 惑星質量と入射フラックスの関係 (Fortney et al. [19])

第3章　「TRISPEC」を用いた系外惑星試験観測

試験観測の目的は、「TRISPEC」の測光精度がどの程度出るかを事前に調べたうえで、太陽系外惑星の熱輻射の直接検出を視野に入れた「可視赤外線カメラ」の開発の指針を得ることである。この章では、「TRISPEC」で観測したトランジット現象の結果について述べたうえで、「TRISPEC」との比較から「可視赤外線カメラ」の測光精度の可能性について述べる。

3.1　観測ターゲット・観測法

トランジット法の試験観測のターゲットとして、TrES-1 を選んだ (図 3.1)。TrES-1 は V バンド (中心波長 0.55 μm) で 11.4 等、K バンド (中心波長 2.179 μm) で 9.8 等の天体で、トランジット持続時間 (transit duration) がおよそ 2.45 時間、トランジットの深さ (depth) が 25.5 mmag(1.73 %) という特徴を持った天体である。この天体のある領域は、TrES-1 と似た色と等級を持つ天体があるため相対測光にも向いている。

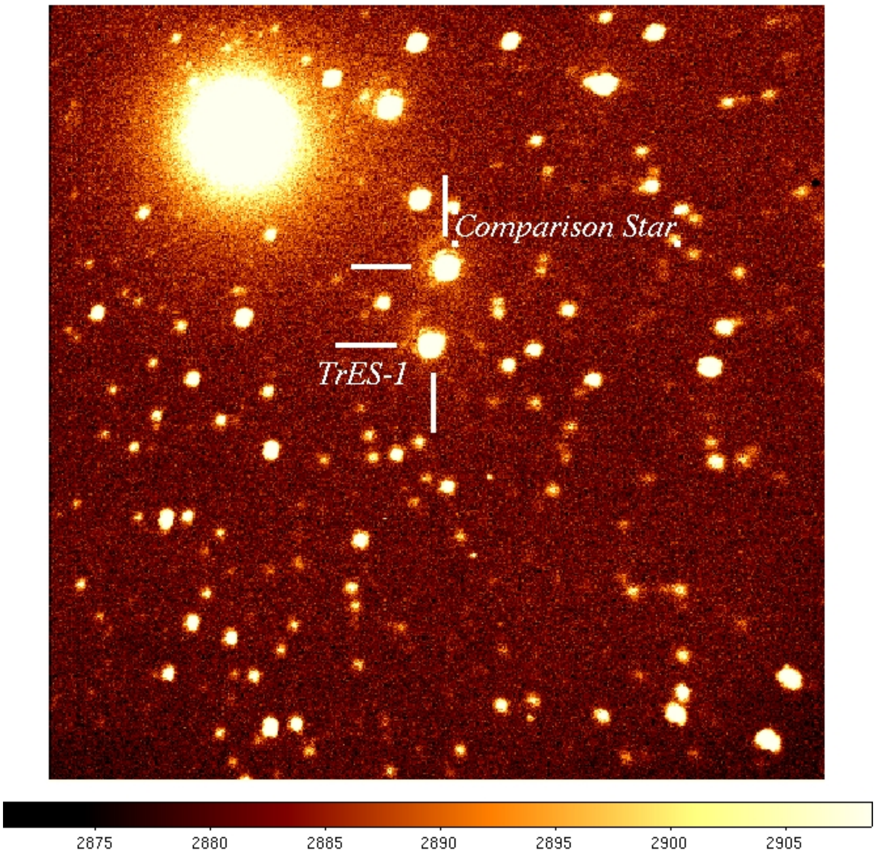


図 3.1: TrES-1 と比較星の画像 (R バンド)

今回は、ディザリング観測を行った。ディザリングとは、視野を少しずつずらし観測する手法をいう。このようなことをする理由として、赤外線では、地球大気や望遠鏡からの放射からも背景光となってしまうため、このような背景光を除去の必要性のため行う。赤外線の背景光は、観測高度や大気の状態によって、視野内の明るさの傾斜パターンが徐々に変化する。そのため、背景光を取り除くためには、観測した画像そのものを使う必要がある。ただし、観測した画像には天体も写っているため、視野を少しずつずらして同じ場所に天体が写らないようにして何点か観測し、それらの画像をメジアンで重ね合わせて背景光だけの画像を作る。加えて、ディザリングは検出器上のバッドピクセルを避けるのにも有効である。ディザリングは 5 箇所ずらして行った (図 3.2)。

また、TRISPEC の検出器の 1 画素あたりの飽和電荷量が小さいため、サチレーションを防ぐために意図的に焦点をずらす必要がある。今回は、ぼかしのため副鏡位置は-0.648mm にし、内部フォーカスは R:140、J:150、Ks:80 にした。積分時間は、R バンドが 20 秒、J バンドが 5 秒、Ks バンドが 1 秒で観測した。観測時間は、日本時刻で 2007 年 8 月 16 日 22:37 から 26:35 までのおよそ 4 時間行った。

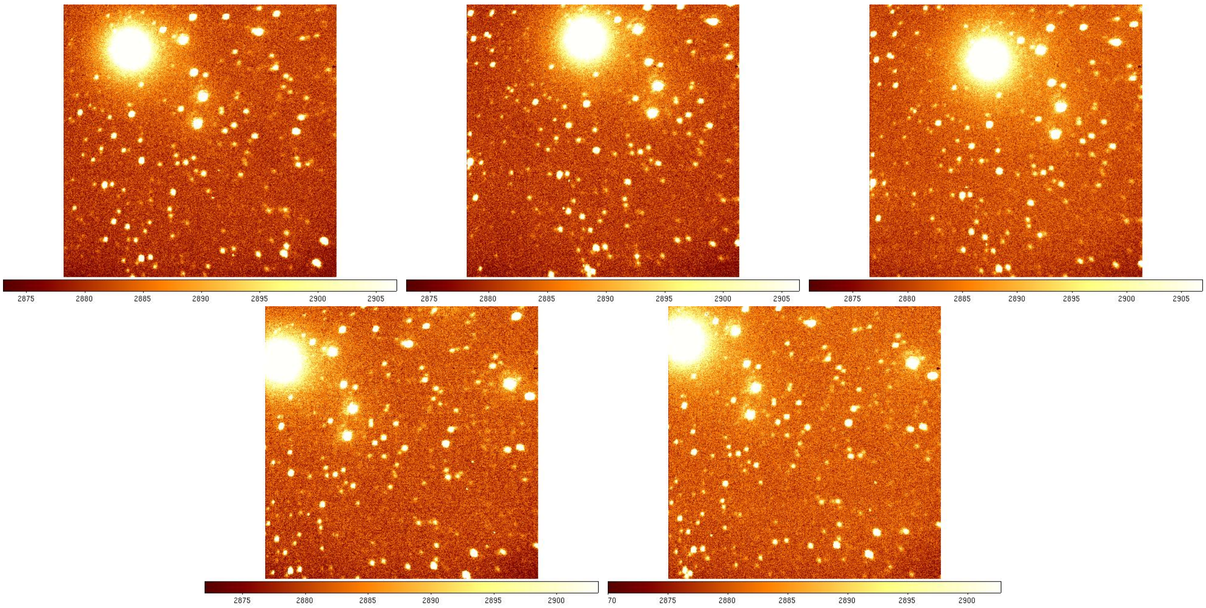


図 3.2: ディザリングごとの TrES-1 の画像 (R バンド)

3.2 解析手順

3.2.1 一次処理

撮像データで取得した生データには、天体からのシグナルの他に様々なノイズが乗っている。具体的には、検出器の暗電流 (ダーク)、空からの放射 (スカイ)、AD 変換のための付加電圧画像 (バイアス) などが挙げられる。これらを除去する処理を一次処理という。このような処理を行う際に用いるソフトウェアとして米国の国立光学天文台 (NOAO) によって開発された光・赤外天文観測データ整約および解析ソフトウェア「IRAF」を用いた。今回の解析では、以下の手順で一次処理を行った。

1. ダークフレームの作成
2. ダークの差引
3. スカイフラットの作成
4. バッドピクセルマスクの作成
5. スカイフラットを用いた感度ムラの補正
6. バッドピクセルの補間
7. スカイバックグラウンドの作成 (各画像ごとにスケーリング)
8. スケーリングしたスカイバックグラウンドの差し引き

2 のフラット作成方法の 1 つに、フラット板を用いて人工的な光による一様な光を当てることで、検出器のピクセルごとの感度ムラを表したフラット (キャルフラット) 画像を作り、そのフラット画像で生データを割ることで、検出器の感度ムラを補正する方法がある。そしてもう 1 つに、ディザリングをして観測天体が写ったフレームからダークを引いたものを重ね合わせ、平均値で割ることでフラットを作る方法がある。画像はメジアンで重ね合わせるため、天体からの寄与は消え、スカイバックグラウンドに検出器の感度ムラをかけたイメージを作ることができる。スカイバックグラウンドは、複数枚重ね合わせたイメージでは一定になっていると考えることができるため、平均値で割れば結果的に感度ムラの情報のみが残ったフラットフレームを作ることができる。今回は、スカイフラットを作成した。

4 のバッドピクセルマスクの作成の際は、ダークフレームとフラットフレームを用いて、感度が悪いピクセルや暗電流が高いピクセルを IRAF の fixpix を用いて除去した。

7 のスカイバックグラウンドについては、1 セットのディザリングにより得られた 5 枚の画像のうち、4 枚をメジアンで重ね合わせスカイ画像を作り、残りの 1 枚に対してスカイを引く方法を用いた。この際、各々のスカイレベルは多少なりとも異なるため、各々のスカイ画像についてスケーリングを行った。生画像と一次処理後の画像を図 3.3 に示す。

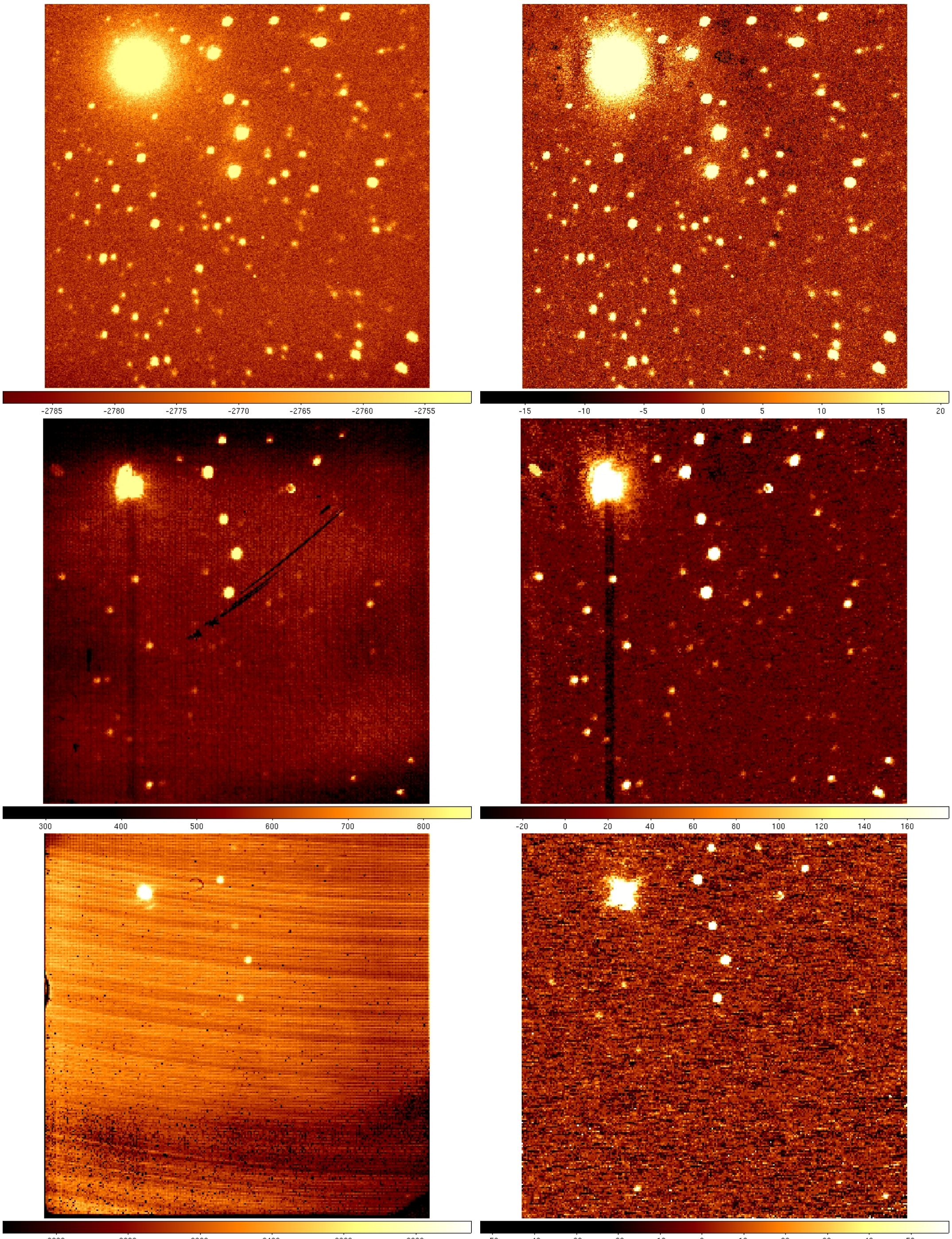


図 3.3: 左:生画像、右:一次処理後 (上から、R、J、Ks バンド)

3.2.2 Aperture 測光

測光方法としては、Aperture 測光と PSF(point-spread function) 測光があるが、今回の解析では Aperture 測光を用いた。Aperture 測光とは、天体からの光の領域である Aperture サイズを決定したうえで切り取り、スカイバックグラウンドを評価する領域である Annulus 領域を用いて、Aperture 領域のスカイバックグラウンドを差し引くことで、天体からの光のカウントを抽出する方法のことをいう。

トランジットは高い精度での解析が必要となるため、このような解析の際にいくつか系統誤差が考えられる。主なものとしては、

- Airmass
- 検出器上の感度むらによる星像の変化
- シーイングサイズあるいは星像サイズの変化

が挙げられる。うち、Airmass に関しては相対測光を行っているため、影響は小さいものと考えられる。また、検出器の感度むらに関しては、スカイフラットを用いた感度むらの補正を行っているため、これについても影響は小さいと思われる (ただし、厳密には調べていない)。今回の解析では、星像サイズの変化に注意して解析を行った。シーイングサイズは時々刻々と変化しているため、取得した画像も常に変化していると思われる。そこで解析の際は、図 3.4 のように Aperture サイズを 21 分割に切り、ある Aperture1 と次の Aperture2 の差がその天体の総フラックスの 0.1 %になったところで、Aperture1 領域をその天体の全フラックスとみなした。スカイバックグラウンドの領域としては、星像中心から 10 ピクセルをスカイの内径としてそこから 3 ピクセル分の円環部をスカイバックグラウンドとした。

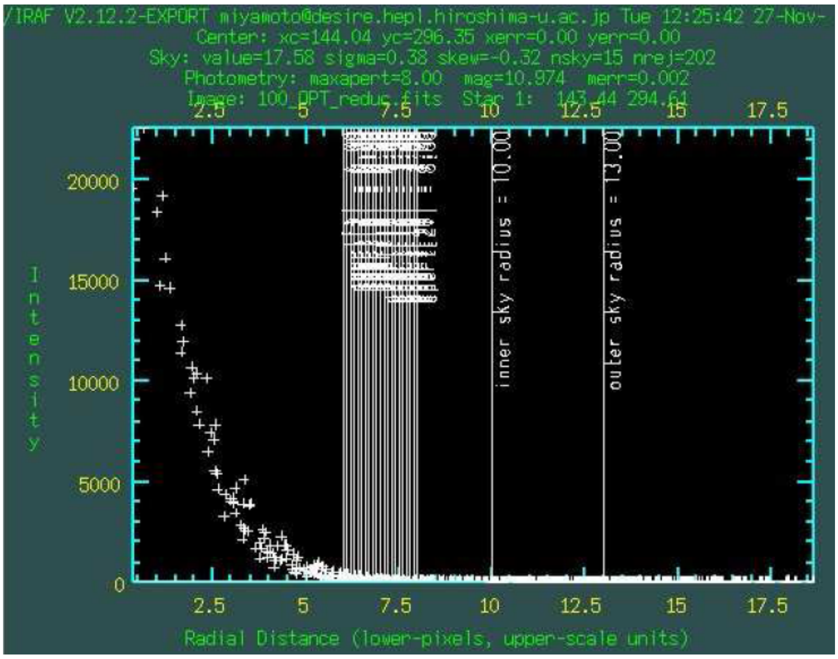


図 3.4: Aperture の切り方の例 (21 分割)

3.3 解析結果と考察

図 3.5 にトランジット中 (※二次惑星食ではない) の TrES-1 の可視光と近赤外線 2 バンドの光度曲線を載せる。グラフには、生データとビンニングデータを同時に載せた。エラーバーは、相対測光による解析のため、目的星と比較星の標準偏差から誤差伝搬により算出したライトカーブのエラーを $1/\sqrt{N}$(N:データ点数) で割った値とした。それぞれ 1σ である。R バンド (中心波長 0.6588 μm) と J バンド (中心波長 1.215 μm) に関しては 200 秒ビンニングを、Ks バンド (中心波長 2.157 μm) に関しては統計を稼ぐため 400 秒ビンニングで評価した。

グラフを見ると、R、J、Ks バンドともトランジット現象が有意に受かっていることが分かる。しかし、ここで重要なのは二次惑星食のための精度であるため、得られた光度曲線のビンニングの結果から、内部エラーの下限値を算出したところ、R バンドは 0.19 %(200 秒ビンニング)、J バンドは 0.44 %(200 秒ビンニング)、Ks バンドは 0.25 %(400 秒ビンニング) と見積もることができた。ただし、光度曲線全体を見ると各々の点は大きくばらついているため、さらにエラーが大きくなることが容易に予想できる。このように感度が悪くなった原因として、1 つに TRISPEC の検出器の画素が粗いことが挙げられる。TRISPEC に用いている可視 CCD は 512×512、近赤外線検出器は 256×256 と非常に小さいフォーマットのものを用いている。そのため、測光解析の際に、アンダーサンプリングを引き起こし測光精度に悪影響を及ぼしたと考えられる。さらに、画素の粗さにより 1 画素あたりに落ち込むスカイノイズも大きくなるため、S/N にも悪影響を及ぼしたことも低感度の要因になったと考えられる。また、検出器の飽和電荷量そのものも小さいため、読み出し時間に対する露出時間があまり稼げず観測効率を悪くし、統計的に稼げなかったことも挙げられる。

以上のことから、「かなた」望遠鏡カセグレン次期観測装置「可視赤外線カメラ」による太陽系外惑星の熱輻射の直接検出 (測光精度 0.1 %) のためには、さらに 5 倍から 10 倍の感度が必要であることが分かった。そして、その感度を達成するには検出器と読み出しシステムが重要であることも分かった。次節では、開発中の観測装置「可視赤外線カメラ」の感度について TRISPEC と比較しながら算出する。

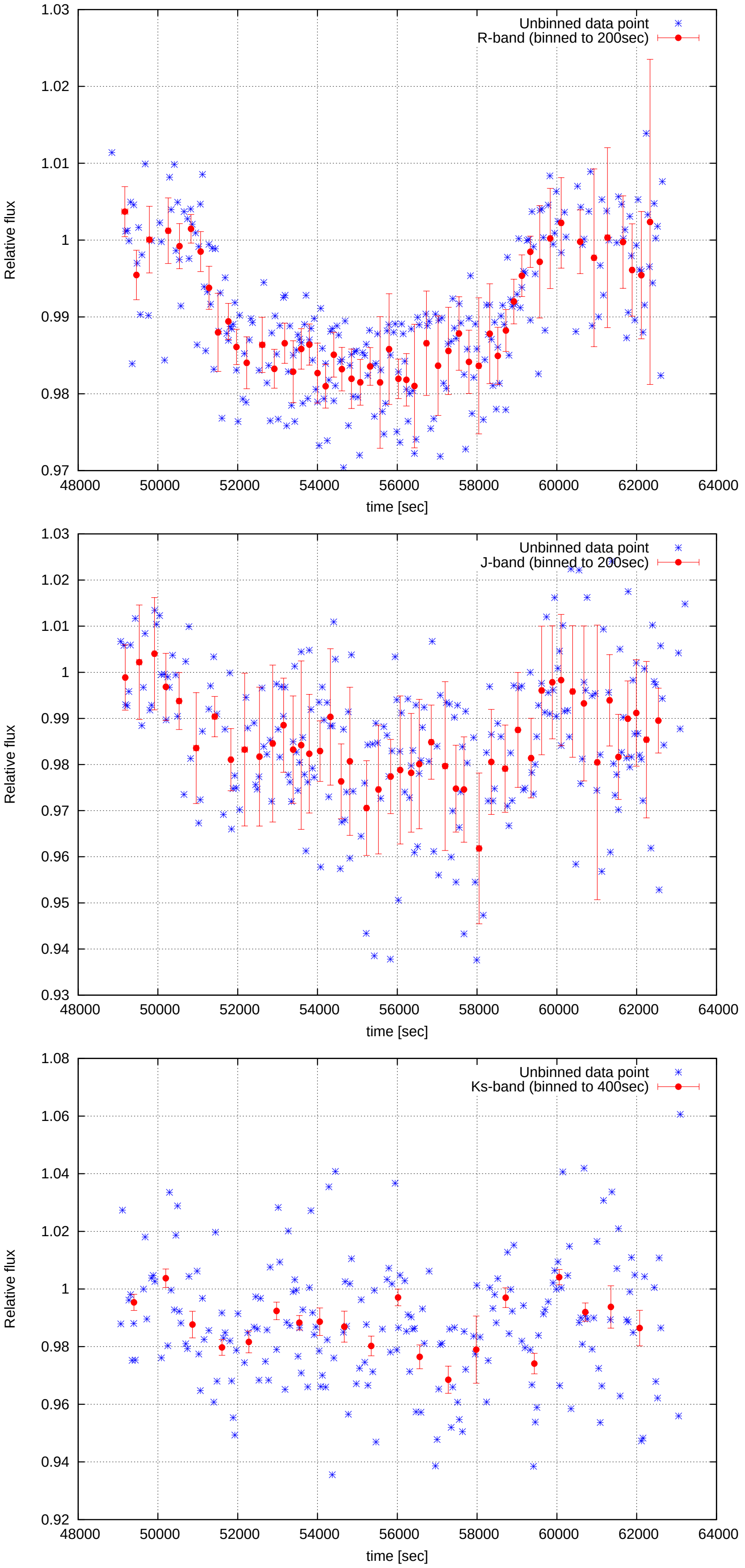


図 3.5: TrES-1 の光度曲線 (上:R バンド、中:J バンド、下:Ks バンド)

3.4 「可視赤外線カメラ」の感度の算出

可視赤外線カメラの感度の算出の方法として、ライトカーブのエラーを考える。ライトカーブのエラーは、誤差伝搬から

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{{F_{com}}^2}\sigma_{main}^2 + \frac{{F_{main}}^2}{{F_{com}}^4}\sigma_{com}^2} \tag{3.1}$$

そして、フラックスのばらつきは

$$\sigma = \sqrt{Flux + pixel_{total} \times \frac{sky}{pixel} + pixel_{total} \times Dark \times time + pixel_{total} \times ReadNoise} \tag{3.2}$$

と表せる。つまり、測光精度はフラックスの揺らぎの他に、スカイノイズ、ダーク、読み出しノイズが主に効いてくる。

TRISPEC と可視赤外線カメラの大きな違いは、検出器のフォーマットの大きさである。TRISPEC は 256×256 フォーマットの検出器を用いているのに対して、可視赤外線カメラは 2048×2048 フォーマットを用いる。TRISPEC の視野が 7 分角であり、可視赤外線カメラの視野が 10 分角であることを考えると、ピクセルスケールは TRISPEC1.64 ''/pixel で可視赤外線カメラは 0.29 ''/pixel である。つまり、スカイノイズは 1/30 まで減少すると考えられる。これだけでも、感度はおよそ 4 倍向上すると考えられる。さらに、検出器の深いフルウェルと最新の読み出しシステムを用いることで観測効率が向上することを考慮に入れると、二次惑星食の検出のために必要な S/N=1000 は十分達成できると考えられる。第 2 部では、目指すサイエンスである太陽系外惑星の直接検出のために必要な感度を出すことを大前提に開発を行っている「可視赤外線カメラ」の開発について述べる。

第II部

可視赤外線同時撮像カメラの開発

第4章　可視赤外線カメラ

4.1　地上望遠鏡の可視赤外線観測装置

光学望遠鏡を用いた地上観測では、地表まで届く可視光線と近赤外線の波長帯が主に観測される (図4.1)。そのため、地上光学望遠鏡に取り付けられる装置は主に可視光線装置と赤外線装置に大別される。可視光線装置と赤外線装置の大きな違いは装置の内部温度である。

可視光線装置の場合、重要となるのがシリコン素子からなる CCD である。CCD は暗電流と電荷の転送効率の両面から見ておよそ 170K が最適な温度であるため、真空冷却下におく必要がある。しかし、常温の物体は可視光を放射しないので、検出器以外の観測装置内部に関しては遮光に十分注意すれば常温のままでよい。

対して赤外線装置は、検出素子が HgCdTe の場合 70-80K が最適な温度となり、CCD に比べ低温にする必要がある。加えて、常温の物体からは赤外線が放射されるため、望遠鏡を通して装置に入射する背景光に対して、装置内部からの熱輻射が無視できるレベルに装置全体を冷却する必要がある。そのため、可視光線装置に比べ赤外線装置は非常に大型なものとなり、冷凍能力の高い大型冷凍機が必要となる。表 4.1 に検出素子ごとの素子最適温度と装置内部最適温度を示す。

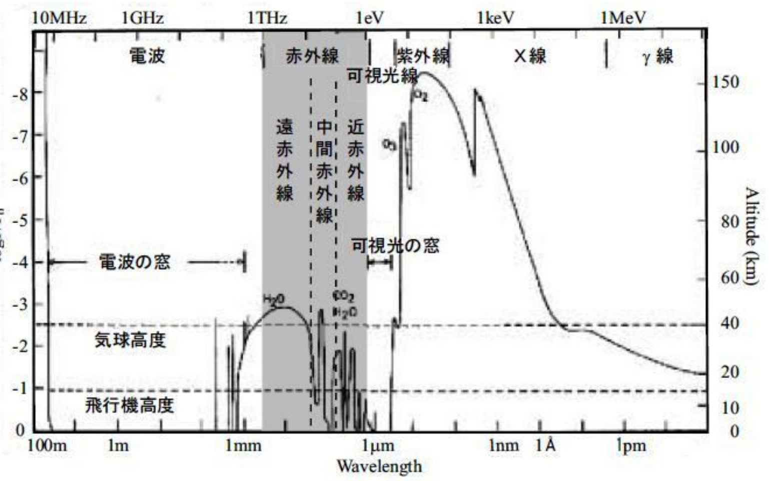


図 4.1: 電磁波の地球大気の透過率

表 4.1: 主な検出素子の最適温度と装置内部の最適温度

検出素子	カットオフ	検出素子温度	装置内部温度
Si	1 μm	170 K	常温
HgCdTe	2.5 μm	70-80 K	～100 K
InSb	5.5 μm	30-40 K	～60 K
Si:As	26 μm	6-10 K	～30 K

4.2 可視赤外線カメラの特徴

「可視赤外線カメラ」は、可視CCD1素子と近赤外線検出器2素子の計3素子による同時撮像が可能な装置である。「TRISPEC」と「可視赤外線カメラ」の大きな違いは、用いる検出器と読み出しシステムである。「TRISPEC」に用いられている検出器は、可視CCDで512×512画素数、近赤外線アレイで256×256画素数と現在の検出器の標準フォーマット2048×2048画素数に比べ、非常に小さいフォーマットのものを使用している。そのため、東広島天文台サイトのシーイングサイズ1”とマッチしていない。加えて、「TRISPEC」の検出器読み出しシステムは、1998年当時にすばる望遠鏡用観測装置の標準データ取得システムとして開発されたMESSIA3を用いている。そのため、最新の検出器読み出しシステムMESSIA5に比べ、データの転送時間が遅い。以下、「TRISPEC」と比較した場合の「可視赤外線カメラ」の特徴を列挙する。

- 検出器の画素数が大幅に増加するため東広島天文台サイトのシーイング1”とマッチした観測が可能であり、アンダーサンプリングを防ぐことができるため測光精度が向上
- 1画素あたりに落ち込むスカイバックグラウンドがTRISPECに比べて1/30まで抑制できるため、スカイノイズを軽減できる
- 「可視赤外線カメラ」に用いる検出器のフルウェルは、TRISPECの検出器に比べ非常に深く、長い積分時間をかけることができるため観測効率が向上する。
- 読み出しシステムは国立天文台開発のMESSIA5を用いておりデータ転送時間を短縮できるため、MESSIA3が用いられているTRISPECに比べて観測効率が改善できる

このため、大幅な感度・精度の向上が期待できると考えられる。次節からは、「可視赤外線カメラ」の光学系と検出器、そして検出器読み出しシステムについて述べる。

4.3 可視赤外線カメラの光学系

可視赤外線カメラに要求される光学系の仕様を表4.2に示す。設計は(株)レンズ屋に依頼した。光学レンズの概観図も併せて図4.2に示す。可視赤外線カメラは、可視域1バンドと近赤外線域2バンドの計3バンドによる同時撮像観測を目的とした装置である。そのため光学レンズは、まず望遠鏡焦点面に収束した光をコリメータレンズ群で平行光とした後、1枚目のダイクロイックミラーで可視域と赤外線域に分け、2枚目のダイクロイックミラーで近赤外線のJバンド域(1.15~1.35 μm)とH&Kバンド域(1.5~2.4 μm)に分け、それぞれのカメラレンズ群でそれぞれの検出器上に光を再結像させることで、3バンド同時撮像を可能とした設計となっている。ただし、現在は可視CCD1素子と近赤外線検出器1素子のみを保有しているため、今のところ2枚目のダイクロイックミラーは使用しない。そのため、近赤外線検出器1素子でJバンドからKバンドまでの波長域をカバーすることができる。

また、望遠鏡焦点面にはスリットホイールを、ヒトミ位置にはヒトミホイールを、ダイクロイックミラー直後の3ヶ所には、それぞれプリズム・フィルターホイールを置く設計となっている。スリットホイールは分光観測モード切り替え時に使用し、ヒトミホイールは検出器に入るバックグラウンド放射をカットするためのマスクとして使用する。表4.3にそれぞれのホイールの8つのスロット(※ヒトミホイールは12スロット)に当面使用する光学素子を示す。ただし、まだ開発段階のため光学素子については完全に決まったわけではないことに注意したい。

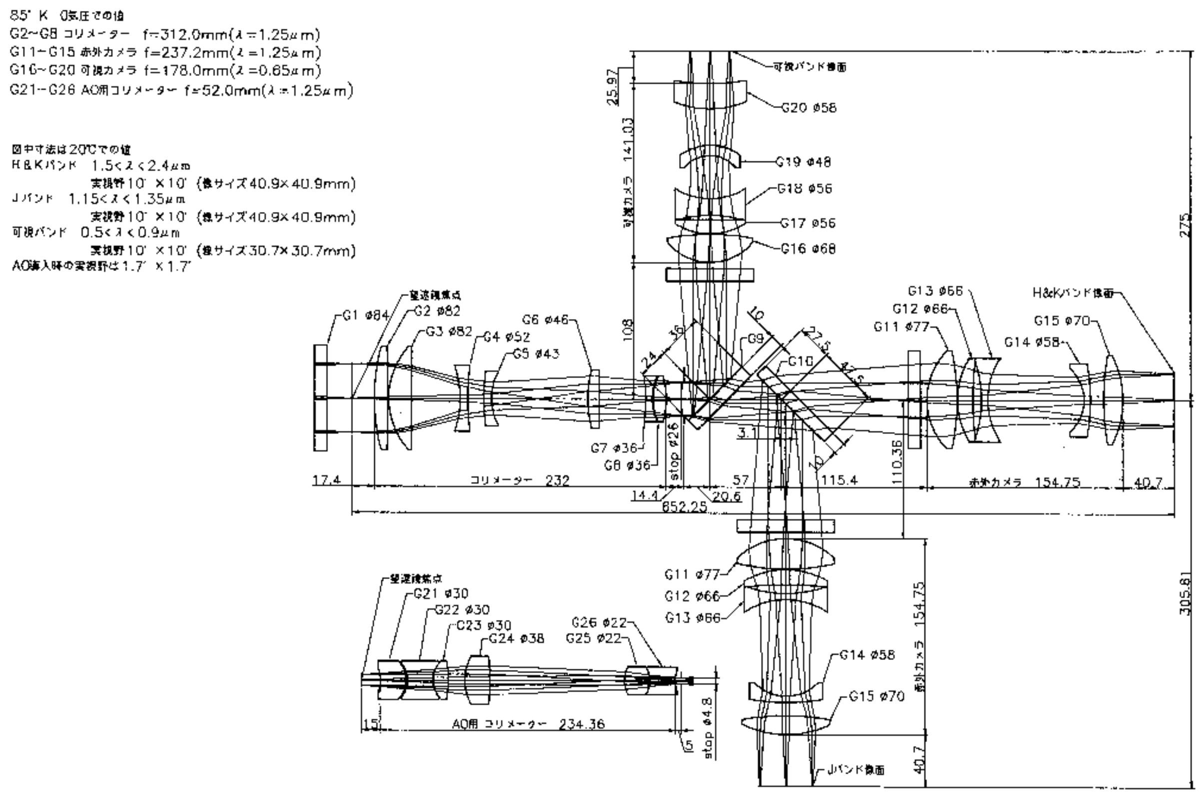


図 4.2: 可視赤外線カメラの光学系

表 4.2: 仕様比較表

項目	仕様	設計値
対象望遠鏡	赤外シミュレーター ＲＣ鏡 D=1540 mm F/12.2 新副鏡付	同左
使用波長域	H&K バンド 1.5< λ < 2.4 μm J バンド 1.15< λ < 1.35 μm 可視バンド 0.5< λ < 0.9 μm	同左
視野	10 ' × 10 ' (対角 14 ') AO 導入時は 1.7 ' × 1.7 ' (対角 2.3 ')	同左
使用 CCD	H&K 及び J バンド 20 μ m^2×2k×2k 受光サイズ 40.96 mm^2 可視バンド 15μm^2×2k×2k 受光サイズ 30.72 mm^2	同左 同左
ピクセルスケール	0.3 '' /pix AO 導入時は、0.05 ''/pix	同左
望遠鏡焦点から結像面までの距離	650 mm 以下	652.25 mm
使用温度	70～100 K	同左
使用気圧	0 気圧	同左

表 4.3: 各ホイールに用いる光学素子

位置＼ホイール	スリット	ヒトミ	IR1 プリズム	IR1 フィルター	OPT プリズム	OPT フィルター
1	素通し	ルーストップ	グリズム 1	J	ND1	V
2	スリット	タイトストップ	グリズム 2	H	ND2	R
3	幅広スリット	グリズム	プリズム	Ks		I
4	写野半分	HWP+P	WP	Ks_narrow		z
5	写野 1/4	ND1	瞳レンズ	K_short		
6	半分スリット	ND2	ワイヤーグリッド	K_long		
7	中央マスク 1	ハルトマンシャッター 1	ND2	Y		
8	中央マスク 2	ハルトマンシャッター 2	素通し	素通し	素通し	素通し
9						
10						
11						
12						

4.4　用いる検出器

「可視赤外線カメラ」に用いる検出器は、将来的には 3 つである。可視光検出器としては浜松ホトニクスと国立天文台で開発された完全空乏型 CCD を、近赤外線検出器としては米 Raythoen 社で開発された HgCdTe 検出器 VIRGO-2K と現在浜松ホトニクスで開発中の InGaAs 検出器を用いる。ただし、InGaAs 検出器についてはまだ開発段階であり実用化に至っていないため、付録 E での紹介にとどめることにする。以下、VIRGO-2K と完全空乏型 CCD について述べる。

4.4.1　近赤外線検出器 VIRGO-2K

VIRGO-2K は、HgCdTe 素子を用いた 2.5 μm で量子効率 50 %の感度を持つ検出器で、赤外線検出器では最大の 2048×2048 の画素数を持つ。検出器のスイッチ回路部であるマルチプレクサ (MUX) は Si-CMOS でできており、検出素子である HgCdTe の' 表面' と素子ごとにインジウムで接合されたハイブリット構造となっている。つまり、VIRGO-2K は素子の電極部分を避けるための裏面照射型の検出器である。また、モザイクカメラの用途としても用いられる検出器であるため 3 面バッタブル構造 (複数の検出器を隙間なく敷き詰める構造) となっている。図 4.3 に VIRGO-2K の写真を、表 4.4 に Raytheon 社による VIRGO-2K の仕様を、そして図 4.4 に我々が用いる module49 の Raythoen 社による量子効率の測定グラフを載せる。また、近赤外線検出器の具体的な構造と VIRGO-2K の集積回路について付録 A に載せる。

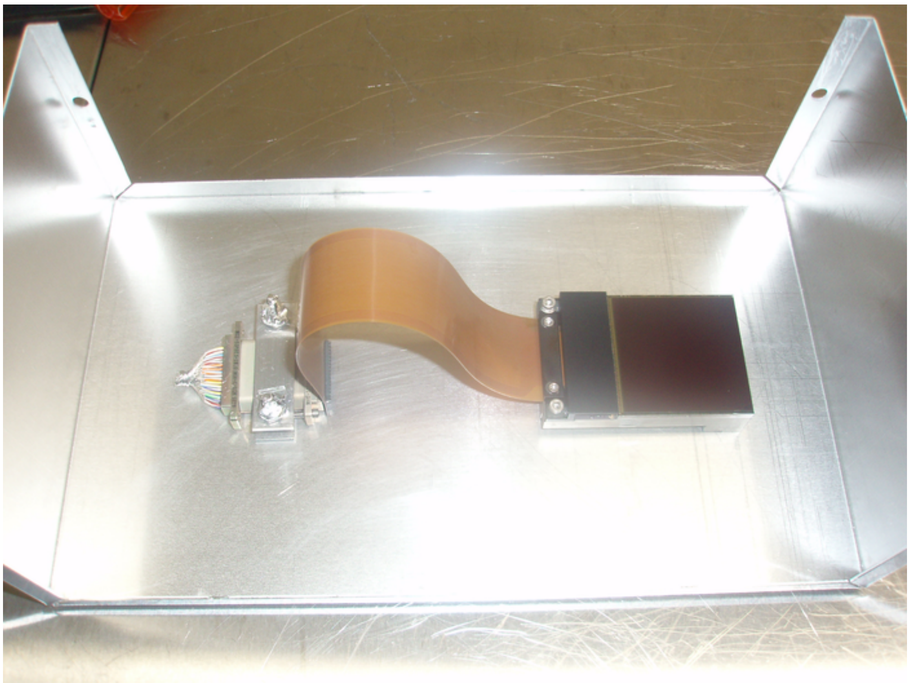


図 4.3: VIRGO-2K

表 4.4: VIRGO-2K の仕様

ピクセルサイズ	20 μm×20 μm
画素数	2048×2048 pixel
検出素子	HgCdTe
有感度波長域	0.9–2.5 μm
量子効率	>70 %(1–2.4 mum)
操作適正温度	80 K
暗電流	<1 electron/sec
出力数	4 or 16
最大フレームレート	16 出力：1.456 Hz(685.75 msec) 4 出力: 0.377 Hz(2.655 sec)
リセットオプション	Global or Row-by-Row
飽和電荷量	$> 4 \times 10^5$ electrons
トランスインピーダンス	∼ 2.0 µ V/electron
ノイズ	5–15 electrons rms
端子数	84

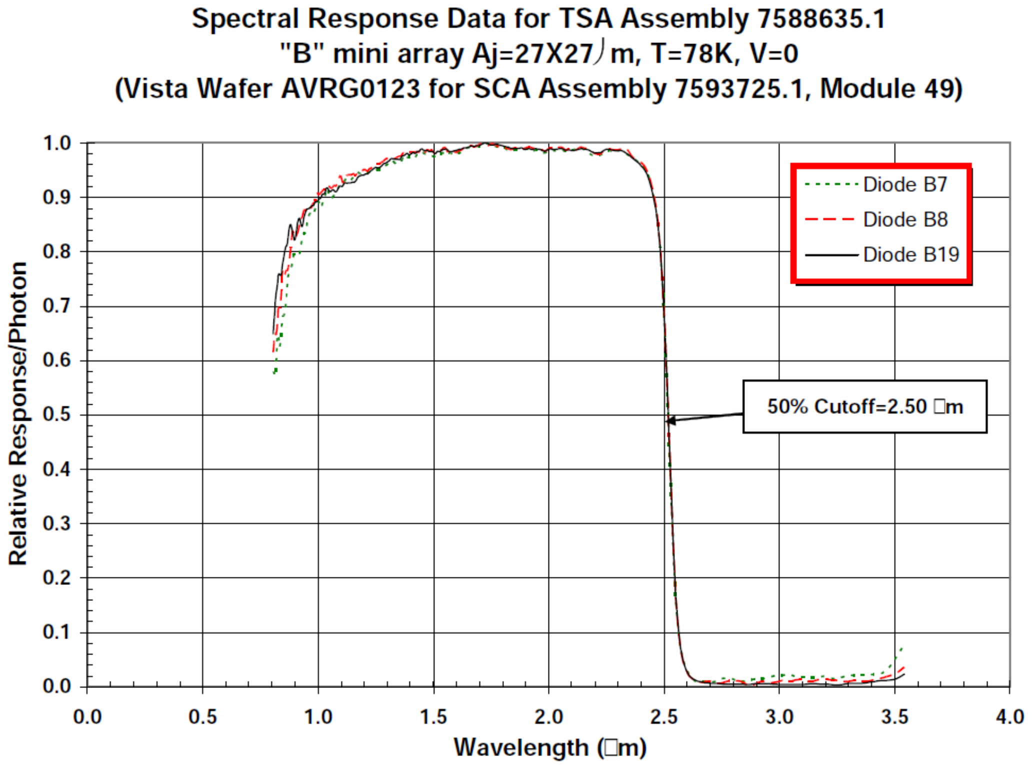


図 4.4: VIRGO-2K(mudule49) の量子効率

4.4.2 完全空乏型 CCD

完全空乏型 CCD は浜松ホトニクスと国立天文台で開発された可視光検出器である。この検出器は、300 μm 厚のウェハーを完全に空乏層にすることで波長 1 μm で 50 %以上の量子効率を得ることができるという特徴を有している。CCD の空乏層の厚さは、半導体の不純物濃度とかける逆バイアスの電圧で決まり、元来は 10 μm から厚いもので 50 μm のものが一般的であった。しかし近年、n 型半導体の不純物濃度を低くできる中性子ビーム法や超高純度シリコン材料の精製技術の発展により、CCD の高性能化がさらに進んでいる。図 4.5 に完全空乏型 CCD の写真を、表 4.5 に仕様を、図 4.6 に完全空乏型 CCD の量子効率を示す。

なお、「可視赤外線カメラ」に用いる完全空乏型 CCD はエンジニアリンググレードであり、フォーマットは VIRGO-2K と合わせるため 2k×4k 領域の内、ある 2k×2k 領域を用いる。

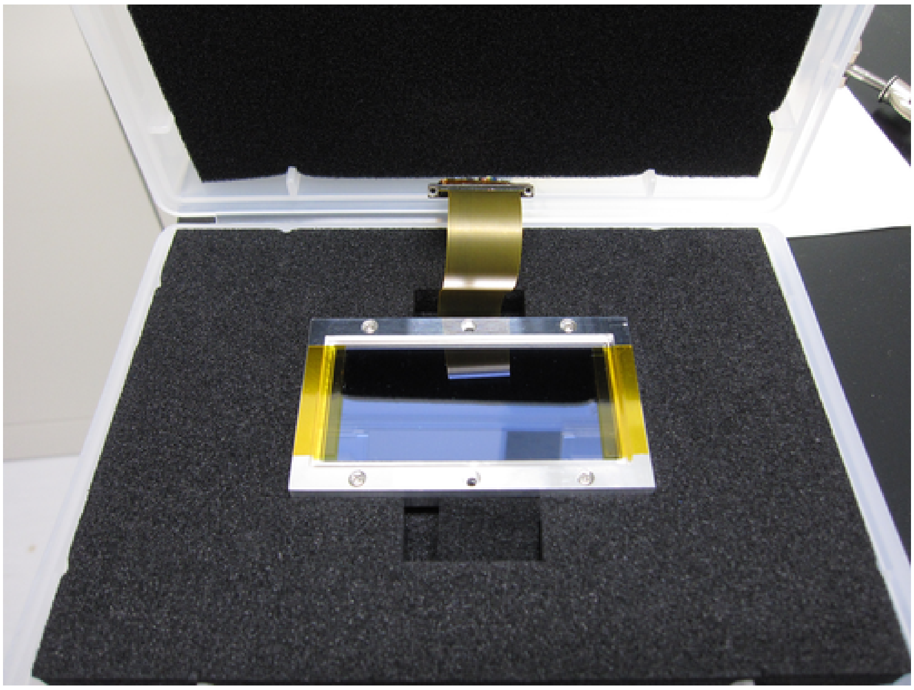


図 4.5: 完全空乏型 CCD

表 4.5: 完全空乏型 CCD の仕様

ピクセルサイズ	15 μm × 15 μm
画素数	2048 × 4096 pixel
読み出しノイズ	$\leq$ 5 electrons rms
ノードセンシティビティ	$\geq$ 5 μV/electrons
転送効率	$\geq$ 0.999995
飽和電荷量	$\geq$ 100000 electrons
暗電流	$\leq$ 5 electrons/pixel/hour

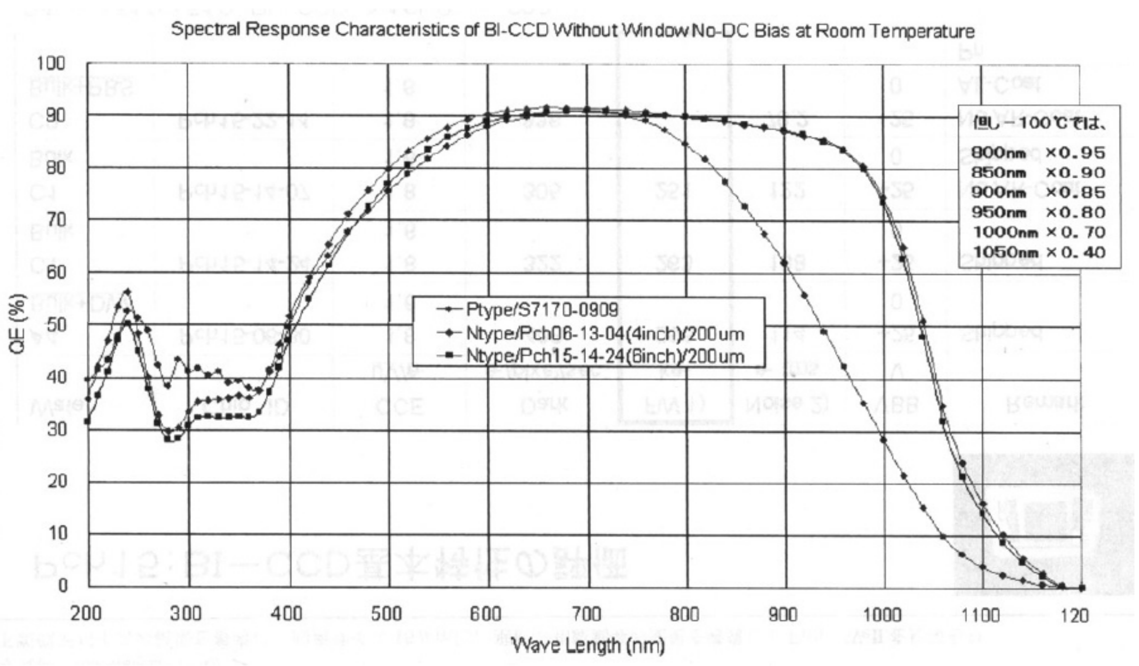


図 4.6: 完全空乏型 CCD の量子効率

4.5 検出器制御システム

4.5.1 デジタル回路「Messia5」

図 4.7: Messia5(上:DSP ボード、下:CMC)

Messia5 は汎用データ取得システムであり、国立天文台が開発した CMC(Common Mezzanine Card) 規格の Mezzanine Card と市販の PCI バス用 DSP ボード Hammerhead(Bitwire 社) から構成される (図 4.7)。Messia5 とホストコンピュータは、PCI バスで直結しており DSP ボードのバススロットで CMC と接続されている。また、1 枚の CMC は 2 つのブロックから構成されており、1 つのブロックに 1 つ DSP が割り当てられ、DSP の Link Port を通じてデータを高速にやりとりする。このブロックには以下の 2 種類ある。

CSB(Clock SequencerBlock) クロックパターンを発生させるためのブロック。クロックパターンは、ホストコンピュータ上に保存してあるファイルを DSP が読み込み、CSB に送られることで発生する。

FGB(Frame Grabber Block) 画像データを DSP ボードへ送り出すためのブロック。MFront2 からの信号を FGB で受け取ることになる。

このブロックの組み合わせにより、CMC には以下の 3 種類のカードがある。

- Combo Mezzanine(CSB–FGB)
- Frame Grabber Mezzanine(FGB–FGB)
- Clock Sequencer Mezzanine(CSB–CSB)

図 4.8 は Combo Mezzanine の構成を示したものである。

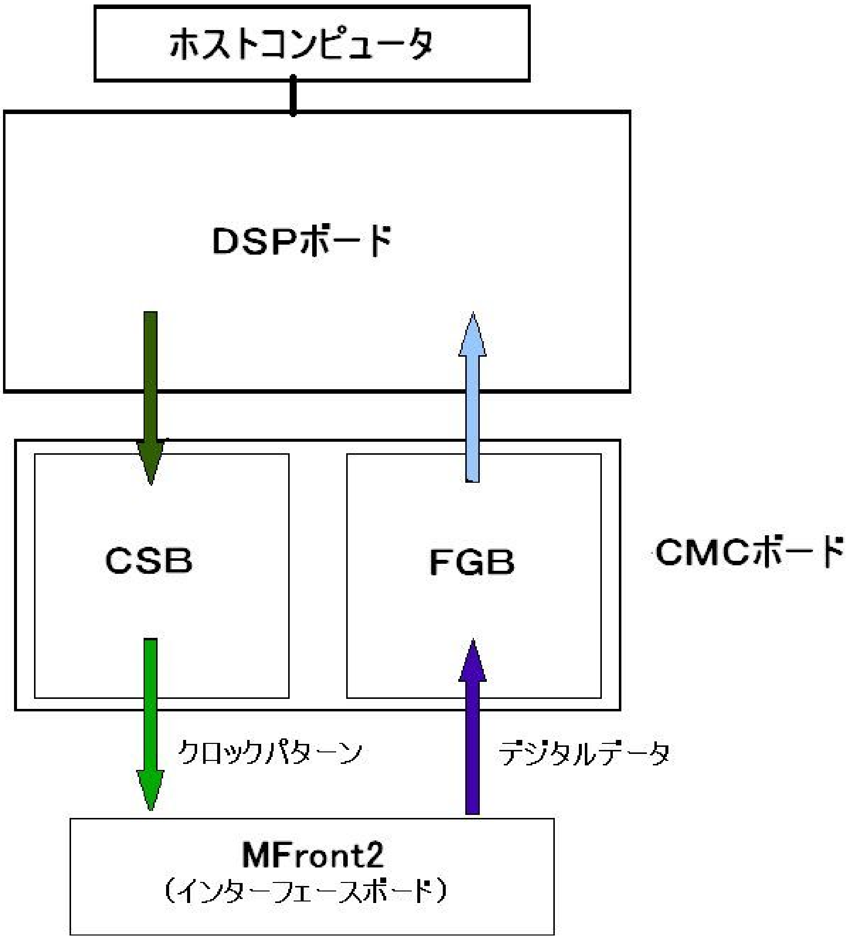


図 4.8: Messia5 の構成

4.5.2 近赤外線検出器専用アナログ回路「MACS2」

MACS2 は、名古屋大学で開発された汎用検出器回路で、アイソレーションボードとクロックドライバボード、ADC ボード+ プリアンプボードで構成されている。クロックドライバボードは、命令したクロックパターンに従い CMC 内の CSB で発生したクロックパターンに電圧値を定義する役割と、検出器に印加するバイアスを発生させ、検出器に供給する役割がある。ADC ボード+プリアンプボードは、検出器の微弱な信号をプリアンプで増幅し、ADC ボードでデジタル信号に変換した後、CMC の FGB に送られる。図 4.10 にプリアンプの簡略化した回路図を載せる。V_D は検出器からの出力で、VnOut は検出器の出力部にあるソースフォロアのドレインに印加しているバイアスである。このバイアスは VIRGO-2K の仕様上、室温では 2.0 V、冷却下では 2.5 V を印加することとなる。また、VIRGO-2K の出力部には 33K Ω の抵抗を挟んで 10 V の電圧を印加している。これは、良好な線形性が出るという Rathoen 社の資料を元にしたことによる。検出器出力信号の増幅回路としては、差動増幅回路を用いているためペア信号として、VnOut を用いることにした。そのため、1 段目のアンプでは

$$V_1 = (V_D - VnOut) \times 3 \tag{4.1}$$

で増幅され、さらに、2 段目のアンプで

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1}(V_1 + V_2) \tag{4.2}$$

で増幅される。現在の設定では、R_1=2 kΩ、R_2=6.8 kΩ としている。つまり、2 段目アンプの増幅率は 3.4 である。そして、CDS で信号の極性を変更し、ADC へ送ることになる。MACS2 の ADC レンジは 0 から+10 V であり、 プリアンプからの出力はこの範囲に収める必要がある。特に、冷却後の検出器の出力電圧値は変化するため、式 (4.1) と式 (4.2) を使って V_2 を適切な電圧値に変更する必要がある。

「可視赤外線カメラ」では、MACS2 は近赤外線検出器 VIRGO-2K 用のエレキとして用いている。ただし、MACS2 は最大 4 チャンネル読み出しが限界であるため、VIRGO-2K も 4 チャンネル出力を用いている。現在、国立天文台の中屋氏が開発中の VIRGO-2K 専用エレキが完成し次第、16 チャンネル読み出しに移行する予定である。

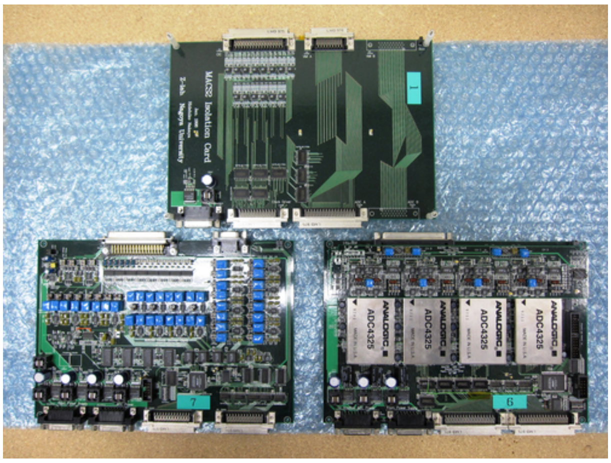


図 4.9: MACS2
上:アイソレーションボード、左下:クロックドライバボード、右下:ADC ボード+プリアンプカード

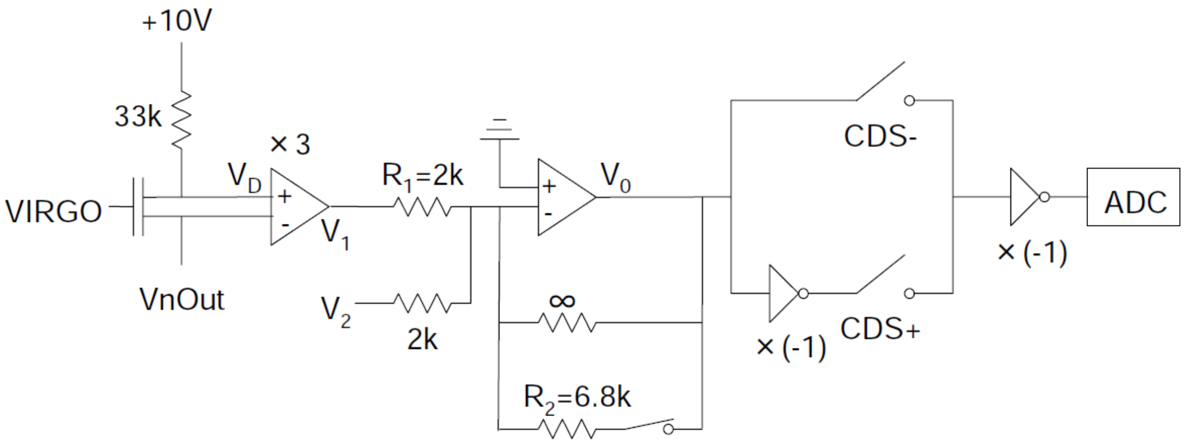


図 4.10: MACS2 プリアンプ

4.5.3 完全空乏型 CCD 専用アナログ回路「MFront2」

MFront2 は、国立天文台が開発した汎用検出器フロントエンドエレクトロニクスであり、電源ボード、インターフェースボード、バイアスボード、シグナルおよび ADC ボード、プリアンプボードそしてスロット用のバックプレーンボードで構成される (図 4.11)。

図 4.11: MFront2
左上:電源ボード、右上:インターフェイスボード、左下:バイアスボード、右下:ADC ボード

MFront2 は、ホストコンピュータ-電源ボード間、電源-電源ボード間および Messia5-インターフェース間でケーブルを通して接続されている。Messia5-インターフェースボード間では、前項で説明したようにクロックパターンが Messia5 から供給されインターフェースボードを通してバイアスボードに送られる。また、ホストコンピュータで設定した電圧値が、バイアスボード上で実際に出力される。そして、バイアスボードで発生したバイアスは検出器に送られ、クロックはプリアンプボードのクロックドライバを通して検出器に送られる。検出器からの信号は、プリアンプボードのプリアンプで増幅させ ADC ボードでデジタル信号に変換しインターフェースボードを通じて Messia5 に入力され、画像として取得される。「可視赤外線カメラ」では、MFront2 は完全空乏型 CCD の読み出しエレキとして用いている。

4.6 本研究の目的

本研究の目的は、太陽系外惑星の熱輻射の直接検出を視野に入れた「可視赤外線カメラ」の開発である。第 1 部第 3 章の考察で述べたように「可視赤外線カメラ」は、用いる検出器そのものの性能やピクセルスケール、読み出しシステムの関係などから S/N=1000 が十分出せる装置である。ただ、装置の開発は検出器部だけにとどまらず、フィルター等の光学素子交換機構駆動の開発や温度制御システムの構築など、装置そのものの稼働システムの構築も必要となる。第 5 章では、モータの駆動制御およびシャッター制御のためのドライバの開発について述べる。第 6 章では、「可視赤外線カメラ」の真空槽の性能評価および温度モニタリング・コントロールシステムの立ち上げ、さらにレンズ系の調整について述べる。

そして、「可視赤外線カメラ」は 2009 年 2 月に「かなた」望遠鏡に搭載してのファーストライトに成功した。このことについて、第 7 章で述べる。そして最後に、検出器について実験室と「かなた」望遠鏡搭載時の性能の違いについて述べ、この論文を締めくくることとする。

第5章　各種制御系の開発

5.1　統合制御概略

「可視赤外線カメラ」で制御が必要となるのは、主に検出器コントローラと検出器の温度制御システム、真空槽の温度モニターシステムおよび真空度計測システム、露出時間制御のためのシャッター制御、そしてフィルターやプリズム等の光学系の交換のためのホイール制御である。図5.1は「可視赤外線カメラ」の制御系統括図である。

HgCdTe検出器の冷却温度は80 K、Si検出器は170 Kが量子効率と電荷転送効率および暗電流の観点から最適な温度とされているため、ヒーターを用いた温度制御が必要となる。また、赤外線は常温の物体からも放射されるため装置全体を冷却する必要があり、要求される温度が100 K以下であるため、常にこの温度を保つために真空槽の光学定盤を常に温度モニターする必要がある。また、可視光検出器であるCCDの露出時間はシャッターに依存するので検出器読み出しの際はシャッター制御も同時に行う必要がある。そして、撮像観測や分光観測・偏光観測の際のフィルターやスリット・プリズム・グリズム・ウォラストンプリズムの交換などに用いるホイールの駆動のためのモータの制御も必要となる。これらの制御について、検出器・温度コントローラ・温度モニター・真空モニター・シャッターは検出器制御PCであるLinuxマシンからシリアル通信での制御を、モータは制御マシンであるWindowsPCに対して検出器マシンからソケット通信による制御を行う必要がある。よって、利便性と観測効率向上のためにも全ての制御は検出器マシンであるLinuxマシンにより統合する必要がある。この章では、ホイールとシャッター制御について述べる。

5.2　ホイール制御概略

「可視赤外線カメラ」に用いる光学素子の交換機構として、ステッピングモータの動力をカウンタギアに伝え、カウンタギアとホイールのギアが噛み合いホイールが回転することで素子を交換する機構を用いている。ステッピングモータは、Portescap社が提供しているものを用い、モータードライバは日本パルスモータ社提供のMotionnetを用いた。以下、開発したモーター制御システムについて述べる。

5.2.1　ホイールとステッピングモータ

「可視赤外線カメラ」の光学素子交換機構として、図5.2の左図のようなホイールを用いている。構造としては、図5.2の右図のようにモータと繋がっているカウンタギアを通して、ホイールのギアと噛み合い回転させることで、光学素子を交換する構造となっている。ホイール類は、スリットホイール、ヒトミホイール、可視と赤外線にプリズムホイールとフィルターホイールをそれぞれ用いるため、最終的には8つのホイールを同時制御する必要がある。ただし、赤外線1チャンネルと可視のプリズムホイールがないため、当面は5つのホイールの制御を行う。ホイールの

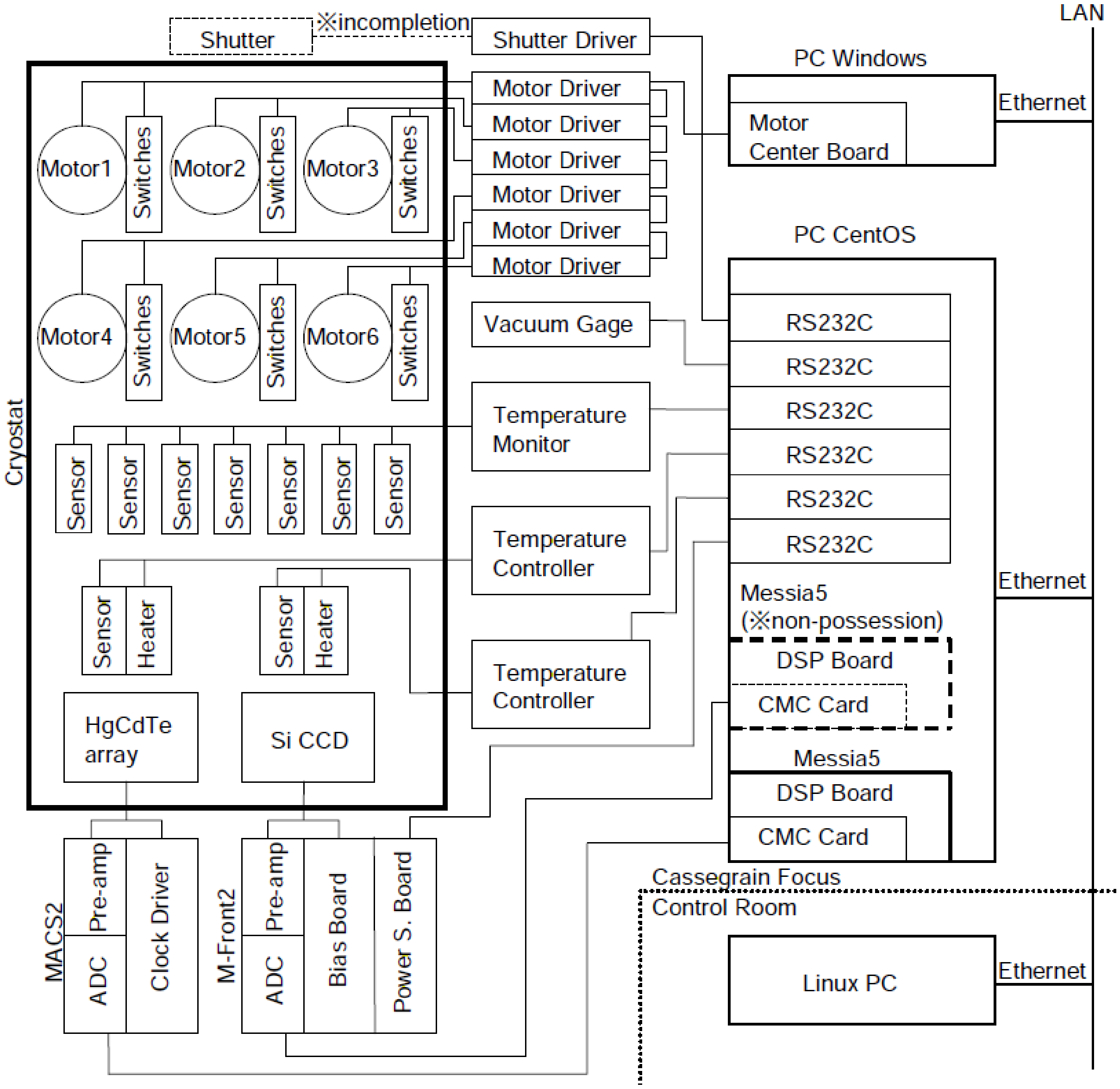


図 5.1: 「可視赤外線カメラ」の制御系統括図

ただし、現在までに開発した制御系までの図であることに注意。最終的には、InGaAs 検出器と専用温度コントロールシステム、プリズム・フィルターホイール用モーターが図に追加される。

光学素子挿入スロットは 8 つあり (※ヒトミホイールは 12 スロット)、第 4 章 4.3 節で紹介した光学素子を用いる予定である。

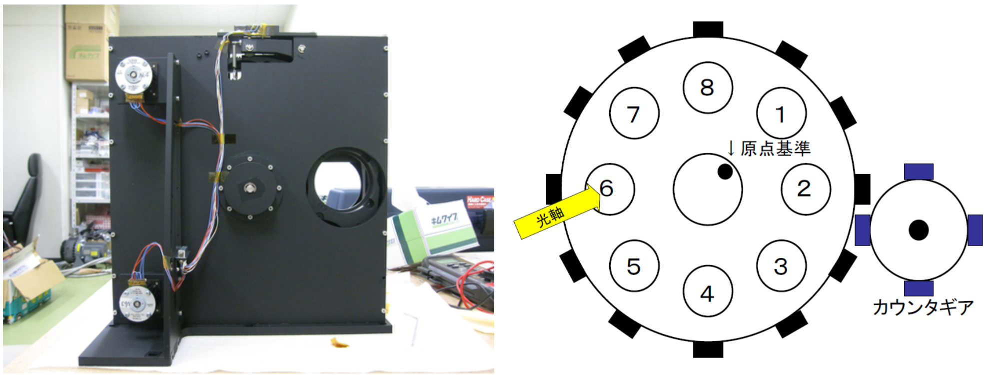


図 5.2: ホイールと構造を示した図

ホイールの位置検出および原点検出はマイクロスイッチで読み取るしくみとなっている。図 5.3 は、位置検出用に用いているマイクロスイッチの写真である。位置検出のために、各スロットに窪みを設けておりアームのボールベアリングがその窪みに落ち込むことでマイクロスイッチが OPEN になるしくみを用いて位置検出を行う。また、図 5.4 は原点検出のためのマイクロスイッチの写真である。原点位置を示す突起物にマイクロスイッチが乗ることでスイッチが CLOSE になるしくみを用いて位置検出を行う。

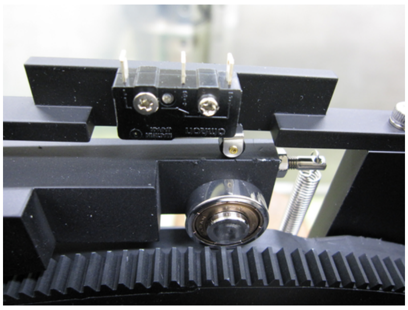


図 5.3: 位置検出スイッチ

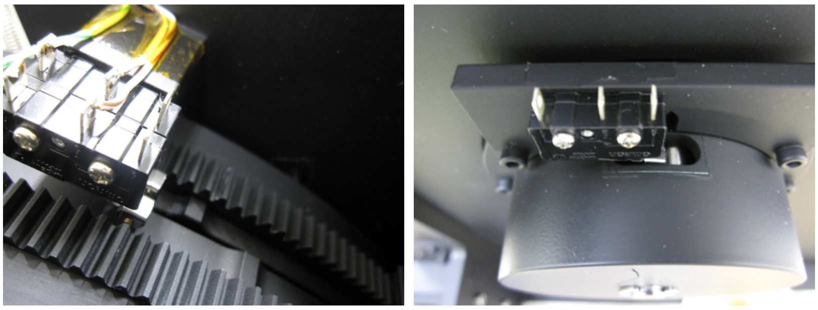


図 5.4: 原点検出スイッチ (左:赤外線ホイール、右:その他のホイール)

ホイールは、ステッピングモータを用いたカウンタギアを通しての駆動を行っている。「可視赤外線カメラ」に用いるモータとして、Portescap 社のステッピングモータ P430(図 5.5) を用いる。ただし、このモータは冷却下での駆動を想定しておらず、内部のボールベアリングは油を用いているため、冷却すると固まってしまい動かなくなる。そこで、冷却下用ボールベアリングとして、フッ素加工コーティングを施したボールベアリング (図 5.6) と交換することで真空低温用に改造した。

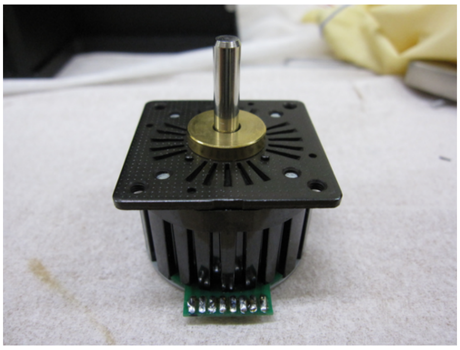


図 5.5: ステッピングモータ

図 5.6: 冷却駆動用ボールベアリング

5.2.2 モータ制御システムの開発

センターボードとローカル・1 軸ステッピングモータドライバ

TRISPEC の冷却駆動系ではホイール類と焦点調節機構の 2 種類からなり全部で 16ヶ所のステッピングモータを用いた駆動部分がある。しかし、これらのモータは 1 つのモータドライバにより制御しているため、モータは 1 つずつしか制御できず、モード切替時の効率が低い。「可視赤外線カメラ」の冷却駆動系は、現在はホイール類に 5 つのステッピングモータ (最終的には 8 つ) を用いており、モータドライバも 5 つ (これも最終的には 8 つ) を用いるため、モータの同時制御が可能となる。「可視赤外線カメラ」ではモータ制御システムとして、日本パルスモータ社 Motionnet シリーズのセンターボード PPCI-L112 とローカル・1 軸ステッピングモータドライバ MNET-BCD4020FB を用いた (図 5.7)。

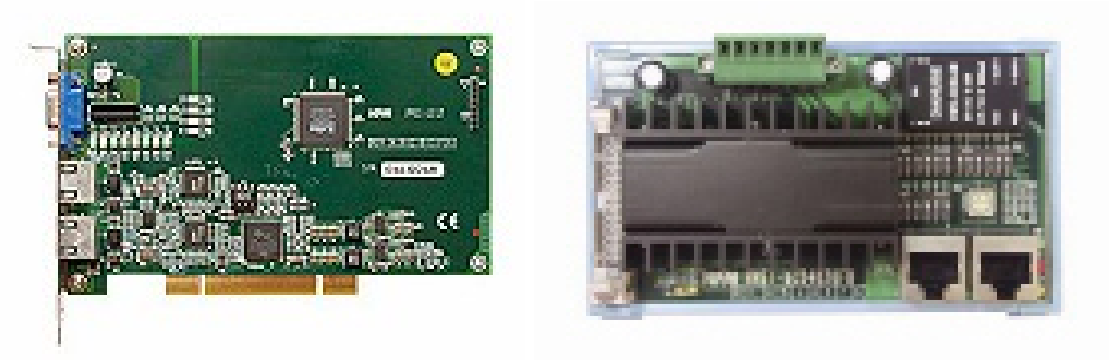


図 5.7: センターボードとローカル・1 軸ステッピングモータドライバ

このシステムの特徴として、

1. パルス入力型ステッピングモータ及びサーボモータの制御が可能

2. Motionnet のラインをモータ制御のみに使用した場合 64 軸同時制御が可能

3. 定速、直線加減速、S 字加減速による連続動作、位置決め動作、原点復帰動作などが行える

が挙げられる。特に特徴 2 は、モータの同時制御の実現のためには重要である。モータドライバば、センターボードからの RS-485 を通したシリアル通信によって制御される。センターボードと各々のモータドライバの接続方式は、LAN ケーブルによるマルチ・ドロップ接続方式がこのシステムの仕様となっている (図 5.8)。

「可視赤外線カメラ」では、モータ制御用 Windows パソコンの PCI バスに接続されているセンタードライバから LAN ケーブルを通してモータドライバに接続し、各々のモータドライバ間は 1 m の LAN ケーブルを用いて接続した。モータに流す電流値は、発熱を抑えるために 0.5 A に設定した。また、真空中にモータを置いた場合、真空の断熱効果でモータが高温になるため、モータを使わない間は電流値を下げる必要がある。そのため、このモータドライバの機能である自動カレントダウンを ON にすることでモータが停止中の間は常に設定電流の 50 %となるようにした。

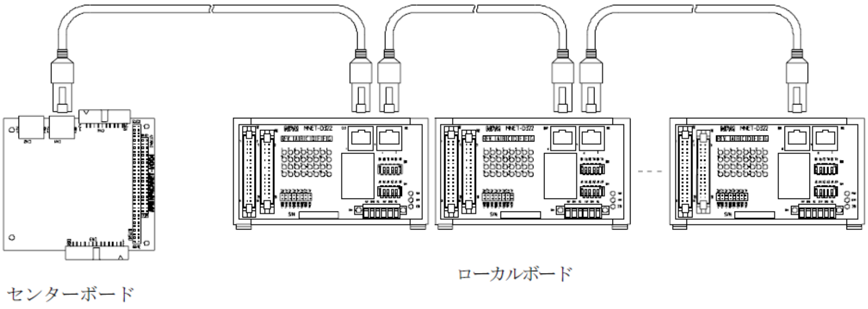


図 5.8: マルチドロップ接続

モータ制御プログラム概略

センタボード PPCI-L112 は、開発環境として Visual C++が仕様となっているため Windows XP マシンを用いて開発を行った。PPCI-L112 の機能としては、シリアル通信とモーション制御に分かれており、それぞれ日本パルスモータ社独自のプロトコルが存在する。推奨されているプログラムの全体の流れは図 5.9 のようになっている。

プログラム開発の指針として、モータは真空槽内で動作するため安定した動作が常に保証できるよう開発を進めた。ホイールの動作は、原点復帰後に指定したスロットに移動する方式を採用した。この方法は、差分方式と比べて動作時間はかかるものの、真空槽内のホイール動作の確認が困難であることを考慮に入れると確実に指定したスロットに移動するため、信頼性は相対的に高い。また、この方式の最長駆動時間はスロット 2 番から原点復帰した後スロット 8 番に移動する駆動が最も長く 25 秒ほどであるが、CCD の読み出し時間が 20 秒強であることを考えると、問題にならない数値である。なお、原点復帰モードにおけるモータの速度は、スリットホイールは 150 PPS(pulse per second) で、他のホイールは 200 PPS で設定した。

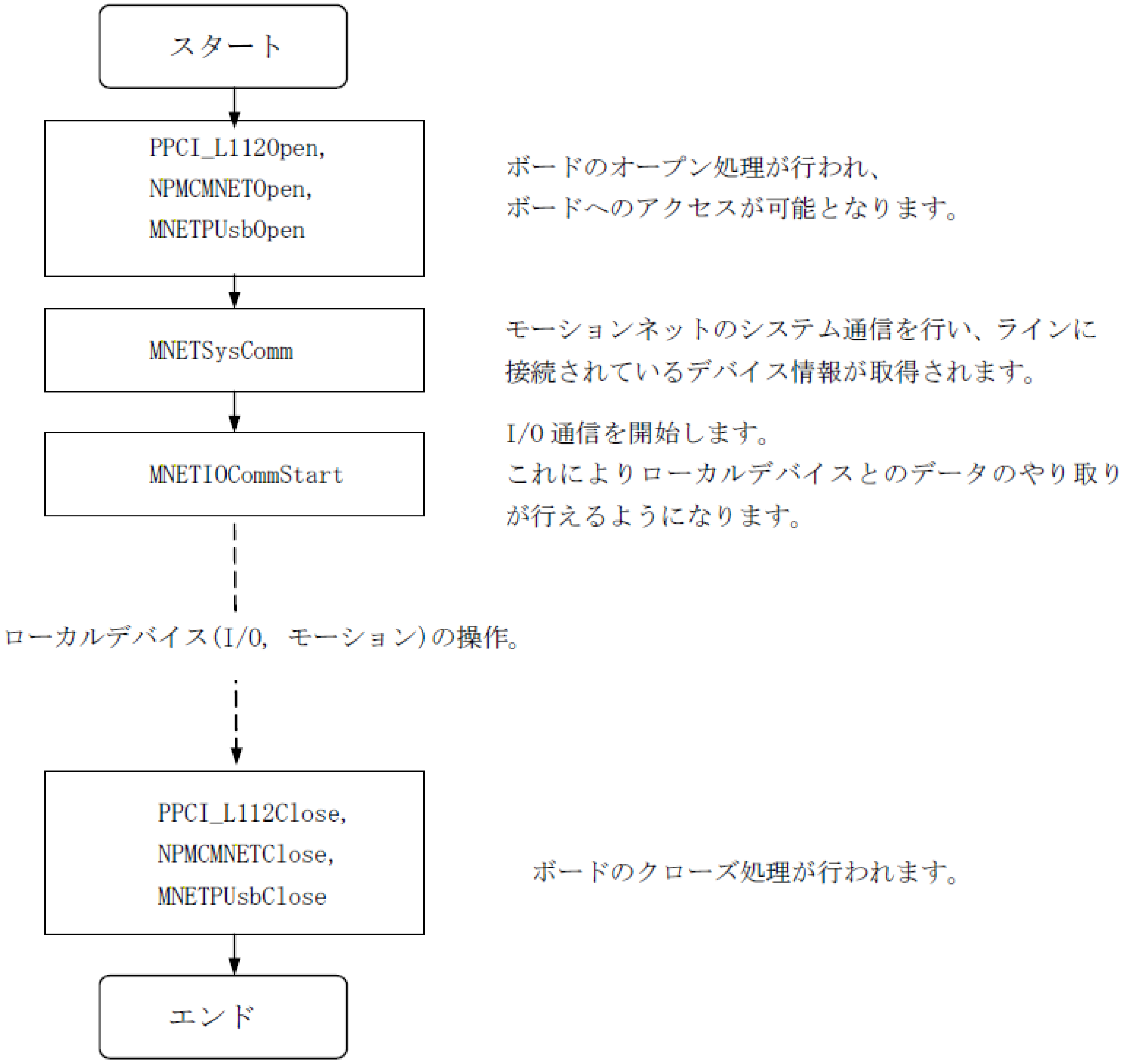


図 5.9: プログラムの全体の流れ

モータの動作は、S 字加減速方式を採用した。S 字加減速とは、加速や減速動作を S 字を描くような滑らかな動作を行うことを指す。この動作の利点として、もし加減速が直線的だと、加速と定速の切り替えタイミングでの速度差が大きくなり、モータがついてこれない可能性がある。特に「可視赤外線カメラ」の場合だと、光学素子交換機構であるホイールも冷却の必要があり真空槽内に入れるため、脱調などによりホイールに異常が生じると非常に手間となる。そういった問題を最小限に抑えるためにも、この加減速方式は非常に有効であるといえる。図 5.10 に S 字加減速のポンチ絵を示す。初速度は 50 PPS で、目標定速度は 400 PPS で設定した。ホイール動作試験では、目標定速度 4000 PPS まで安定したホイール動作を確認したが、「可視赤外線カメラ」のホイール動作時間は、主に原点復帰動作で決まるため、S 字加減速はむやみに速くする必要がなく、むしろ信頼のおける動作が必要であったため、上記の速度とした。

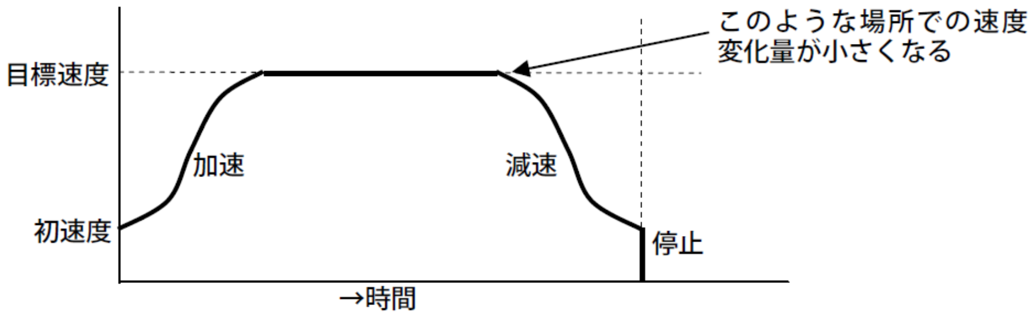


図 5.10: S 字加減速

ソケット通信

モータ制御用の PC は Windows XP を検出器制御用は Linux を用いているため、このままでは実際の観測の際、Linux マシンで検出器を制御しながら Windows マシンでモータを制御することになり、非常に効率が悪くなる。そこで、効率を上げる方法として、ソケット通信を用いてクライアント側である Linux マシンからサーバマシンである Windows マシンを制御することにした。ソケット通信を組み込んだ際のプログラムの全体の流れとしては、図 5.9 の中の MNETIOCommStart で I/O 通信でローカルドライバとのやりとりをできる状態にした後にソケット通信の受信待ちプログラムに入る流れとし、ソケット通信の接続が切れるまでは常にボードをオープンにしておくこととした。これは、ボードを開閉を度々行うことによるメモリーエラーを防ぐためである。図 5.11 に開発したソケット通信のプログラムの流れを示す。

これにより、温度コントロールおよびモニター、真空度モニター、シャッター制御、検出器制御そしてモータ制御すべてを検出器 PC である Linux マシンで行える状態となった。

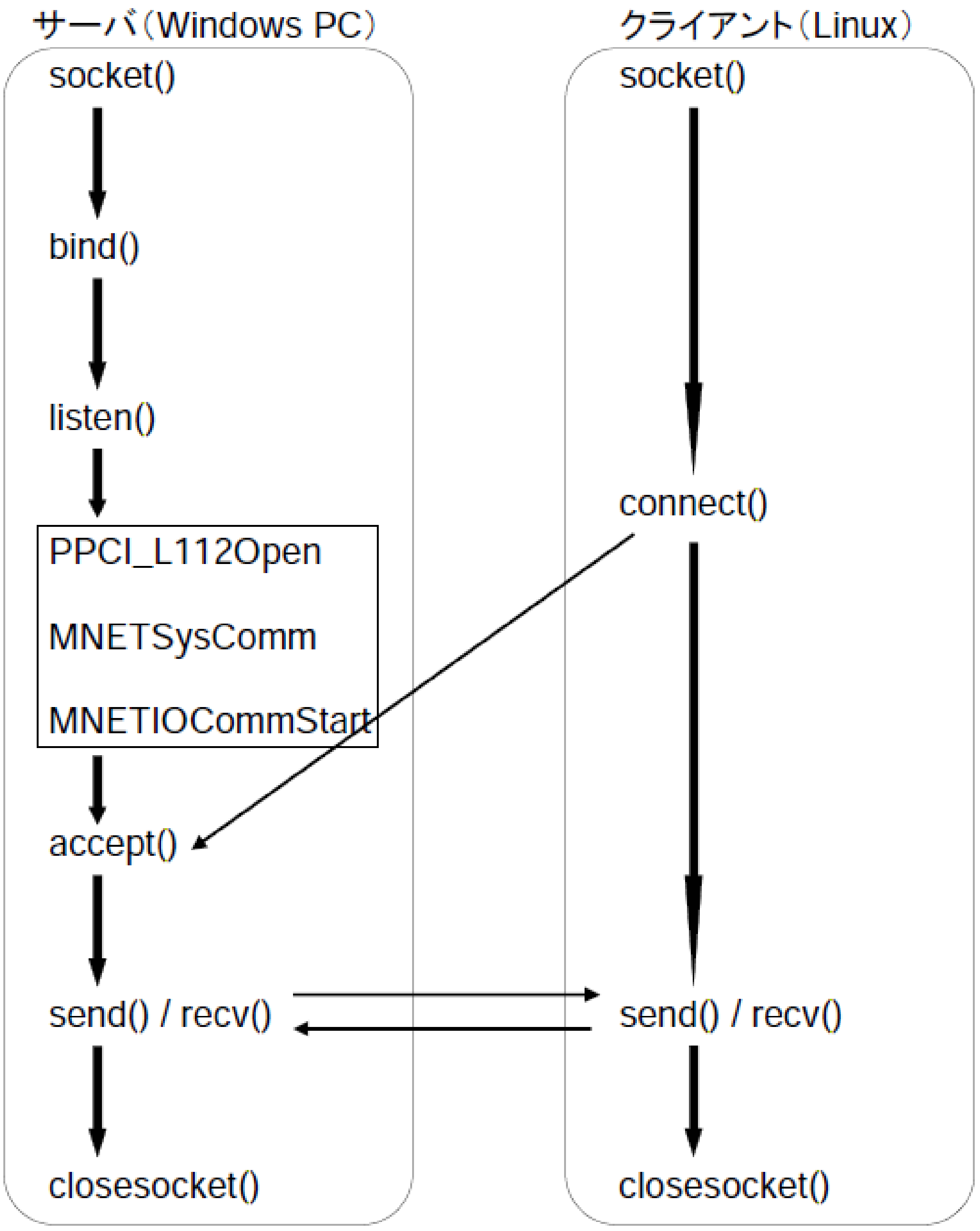


図 5.11: 開発したソケット通信の流れ

5.3 シャッター制御

赤外線検出器と可視 CCD の大きな違いの１つとして、読み出し法が挙げられる。赤外線検出器は読み出しの際、素子に蓄積した電荷を一旦リセットして読み出す仕組みとなっているため、遮光の必要性がない (ただし短時間露出には必要となる)。対して CCD は、蓄積した電荷を転送する仕組みとなっているため、読み出さない間は遮光の必要性がある。そのためシャッターが必要となる。加えて、東広島天文台ではサイエンスの１つとしてガンマ線バーストを狙っており、地上観測におけるガンマ線バーストの観測では即時測光観測が重要となるため、「可視赤外線カメラ」に必要な要件の１つとして、ガンマ線バーストが発生した際すべてのシステムを 1 度キャンセルできるシステムが必要となる。特に、長時間露出をかけた観測の際にガンマ線バーストが発生した場合、実行中のジョブをキャンセルしシャッターを閉じる機構が必須となる。

以下、かなた望遠鏡用に開発したシャッタードライバについて述べる。

5.3.1 AVR マイコンと開発したシャッタードライバ

AVR は、Atmel 社が提供しているワンチップ・マイクロプロセッサである。AVR の特徴は、後発のマイコンであることから使い勝手の良さが追求されており、初心者に対してハードルが低いことが挙げられる。加えて、アセンブラと C 言語のどちらでも開発が可能であることも特徴的であるといえる。AVR の開発環境としては、Atmel 社が無償で提供している統合環境 AVR Studio があり、同じく Atmel 社が提供している WinAVR と呼ばれる gcc ベースの開発環境を AVR Studio に組み込むことで、C 言語の開発が可能となる。

図 5.12: AVR ATmega8

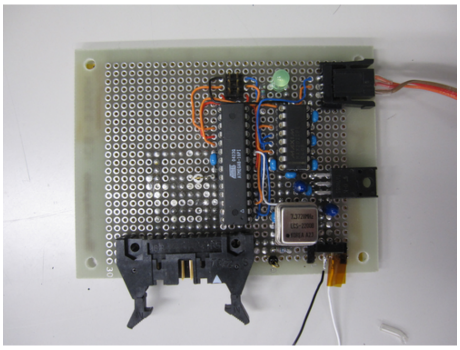


図 5.13: 作成したシャッターボード

今回、シャッタードライバに用いた AVR は ATmega8 である。図 5.12 に ATmega8 を、図 5.13 に実際に作成したボードを載せる。シャッタードライバの開発の際には、以下の点に留意した。

1. 精密な露出時間の制御

2. キャンセル機能の実装

1 に関しては、観測した天体の解析の際、露出時間の正確さは重要な要素となり、測光精度を問う際の重要なパラメータとなるため、開発段階で気を付けなければならない点となる。2 に関しては、東広島天文台で狙うサイエンスの 1 つであるガンマ線バーストの即時測光観測を目指すため、長時間露出観測を行っている場合でもガンマ線バーストが起こった際には、即座にシャッターを閉じるシステムが必要となることからも重要な開発要素となる。このような指針のもと、シャッタードライバの開発を行った。付録 B に AVR に書き込んだプログラムを示す。

5.3.2 USART を利用したシリアル通信制御

シャッターの制御は Linux マシンから行われるため何らかの方法で遠隔制御する必要がある。非同期式シリアル通信を行うための装置を一般に UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) と呼ぶが、AVR には、さらに同期式シリアル通信も可能な USART(Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter) と呼ばれる機能ブロックが用意されている。USART のブロック図を図 5.14 に示す。USART のブロックは大きく分けて、クロック・ジェネレータ部、トランスミッタ部、レシーバ部の 3 つのブロックがある。クロック・ジェネレータ部ではボーレートを生成するための回路が内蔵されており、トランスミッタ部はデータを送出するための回路で構成されており、レシーバ部はデータの受け取りに使われる回路で構成されている。プログラミングをするうえでは通信データと通信制御を行うための計 5 つの I/O レジスタを使用する。通信データは、送信データ・受信データとも同一アドレスをもつ UDR を使用する。ただし、UDR は CPU からの読み込みと書き込みは別々のレジスタに対して行うことになる。通信制御は、UCSRA と UCSRB と UCSRC の 3 つの USART 制御ステータス・レジスタを使用する。各々のステータス・レジスタの詳細は参考文献 [36]、[37] を参照していただきたい。

クロック・ジェネレータ部内のボーレート・ジェネレータで生成される送受信のビット列のタイミングを決定するためのクロックは、USART ボーレート・レジスタに設定した分周値でシステム・クロックを分周したクロック周期となる。分周値を N、システム・クロックを F_{osc} とすると標準速度動作の場合のボーレートは、

$$baudrate = \frac{F_{osc}}{16 \times (N+1)} \tag{5.1}$$

で決定される。シャッタードライバの開発に際して、F_{osc} は 8 MHz としたため分周値は式 (5.1) からおよそ 8 となる。ただし、分周値の設定に関してはプログラム内で式 (5.1) を用いて計算したのち、ボーレート上位 8 ビットはビットシフトさせることで値を切り捨て、下位 8 ビットは計算した値をそのまま用いたため、結果として計算した分周値をそのまま使う形とした。そのため、ボーレートのエラーはほぼ 0 %である。ボーレートは 57600 bps とし安定した通信を実現した。

5.3.3 割り込みを利用した露出中断機能の実装

割り込みとは、通常のプログラムの流れから、ハード的な要因で強制的に別のプログラムを実行することのできる仕組みを言う。シャッタードライバの露出中断機能の実装において、割り込みを用いることとした。AVR の割り込みは、チップ内部の I/O ユニットから割り込みを発生させることができる。WinAVR では割り込み処理を記述する関数として"ISR" というベクトル定義で記述する。また、CPU 全体に割り込みを許可する操作は"sei()" を使用する。

開発したプログラムの流れとしては、まず露出時間を指定することで電圧レベルを 0 V から 5 V に変化させるようにした。外部からの割り込みがない場合は指定した露出時間が経過した後、電圧レベルが 0 V となる (図 5.15 の左)。しかし、もし露出中に外部から中断要請の割り込みがきた場合は、メインルーチンである電圧レベル High の状態を強制的に Low へと引き下げるようにした。これにより、シャッターは露出時間を満たしていなくても強制的に閉じることができるようになった。

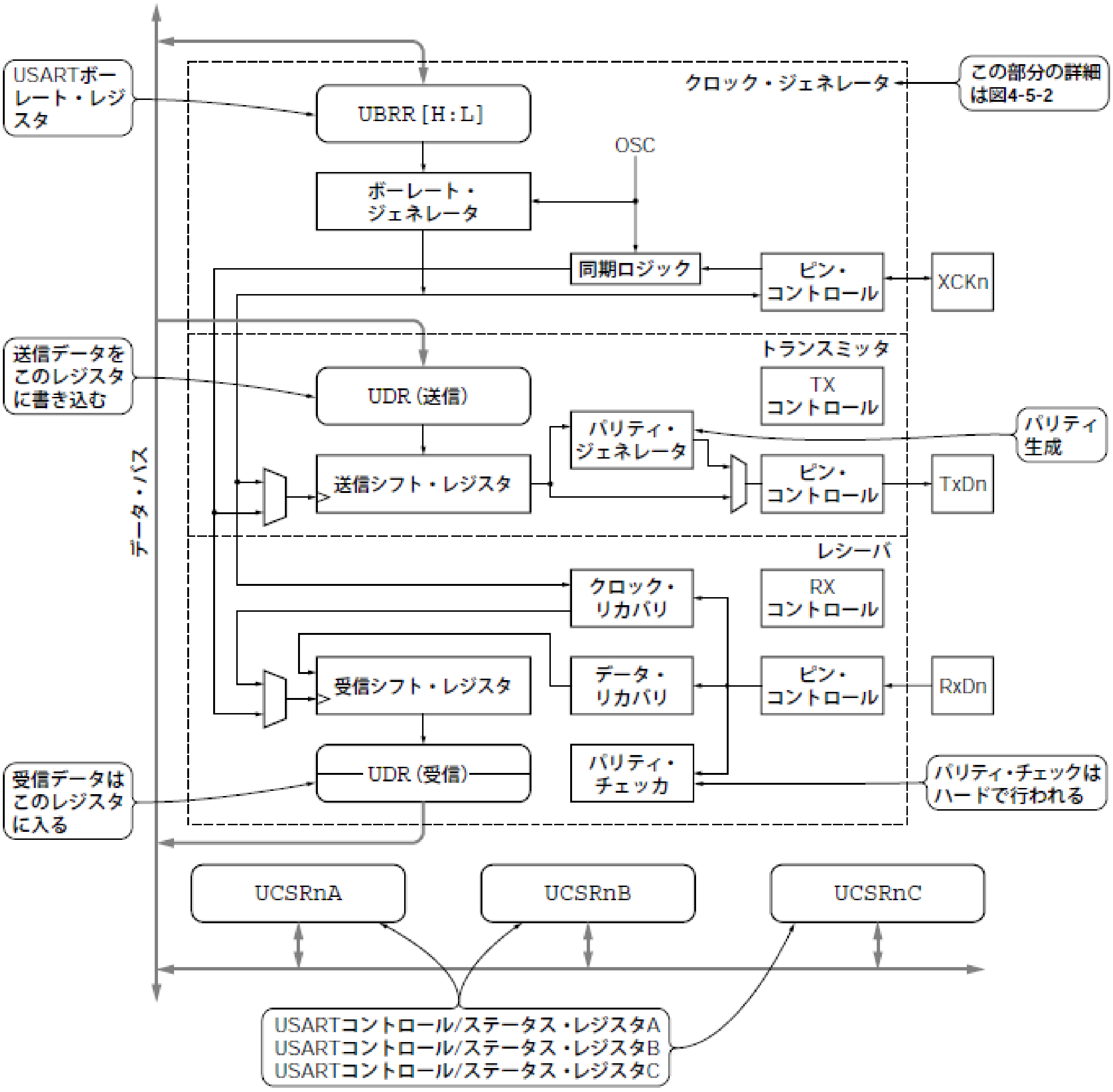


図 5.14: USART のブロック図

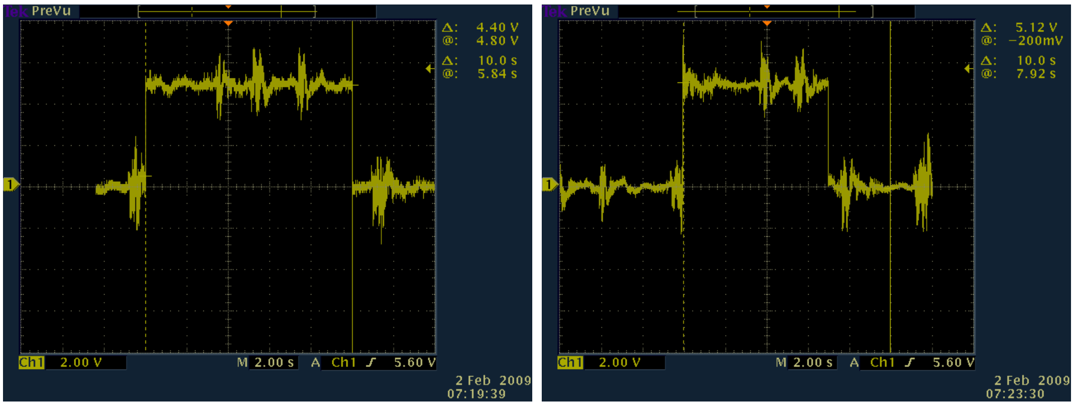


図 5.15: シャッタードライバからの電圧信号の図
左図:10 秒露出を指定した様子、右図:10 秒露出中にキャンセルを入れたときの様子

5.4　制御系の問題点

5.4.1　ホイール

ホイールにおいての最大の問題は、冷却下でのモータの正常な動作である。「可視赤外線カメラ」に用いるモータは、常温用モータを改造したものであり、冷却下での用途を想定していないため、予期しない問題が発生する可能性がある。実際、モータの冷却駆動試験において、出力を 1.5 A に引き上げた状態での試験を行った結果、真空下により熱伝導が悪くなったためモータが異常に発熱し、モータ内部のコイルの回りの接着剤が溶け軸が歪み、磁石とのバランスが悪くなったため、モータが回らなくなる事態が発生した。対策案としては、モータを駆動させない間は電源を切ることが挙げられる。Motionnet 内には、レジスタの設定を変更することでモータ励磁の ON/OFF 制御ができる。こういったことを含め、より信頼性の高い制御を実現するために、より一層プログラムの改良が必要となる。

5.4.2　シャッター

開発したシャッタードライバの最大の欠点は、露出中にキャンセルコマンド以外の文字列を受け取った場合でもプログラムが働いてしまうため、露出時間にずれが生じてしまうことが挙げられる。現在のところの対策案は、シャッター制御中はハードウェアからの命令を発しないようにしている。しかし、これはユーザーの観点からは合理的ではないため、開発者としては改良の余地が残る形となってしまった。今のところ、適したアルゴリズム案はないため、今後も上記の方針でいく可能性があるが、もし可能なら改良を試みたい。

また、「可視赤外線カメラ」に用いるシャッターはウインドの外に置く場合、有効径 85 mm 程度のシャッターが必要となるが市販品にはこのような大口径のシャッターはない。そのため、シャッターの製作も今後の課題となる。

第6章　光学系の調整および真空槽を用いた各種性能評価試験

6.1　「可視赤外線カメラ」に用いる真空冷却システム

可視赤外線カメラの真空槽は大陽日酸株式会社に製作を依頼した。図 6.1 に真空槽の写真を載せる。以下、真空槽に要求される性能と評価試験の結果について紹介する。

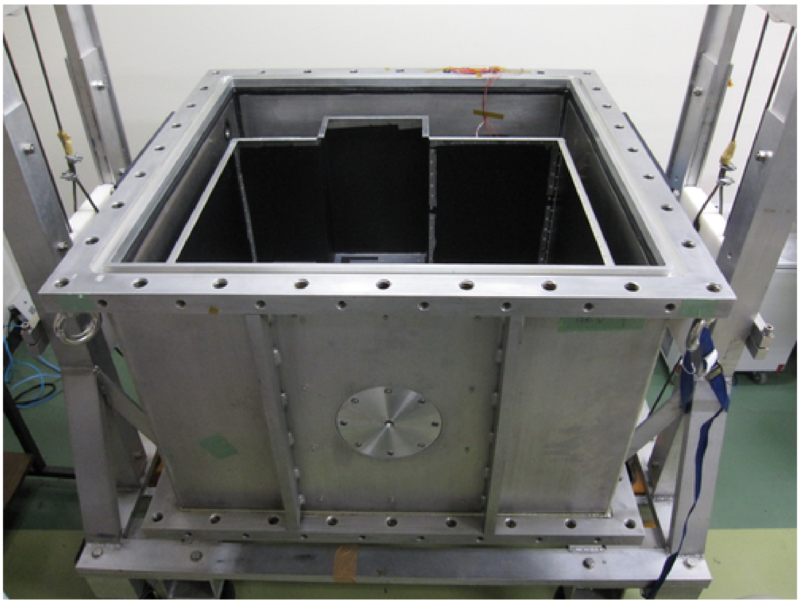


図 6.1: 「可視赤外線カメラ」の真空槽

6.1.1　要求性能

真空槽に要求される性能は、装置内部からの熱輻射が赤外線に対して無視できる温度 100 K に冷却できることである。低温を保つためには、外部環境からの熱流入をあるレベル以下に抑制する必要がある。熱流入は主に、構造物からの熱伝導、気体分子による熱伝導、熱放射の 3 つが挙げられる。

1 つ目の構造物からの熱伝導は、真空槽は構造的に内部の冷却シールド部と外部の常温部が存在するため外部からの熱伝導が避けられない。これを最小限抑えるため、装置外部と装置内部の冷却シールドとの熱伝導を小さくするための素材としてガラスエポキシ樹脂が用いることが多く、実際に可視赤外線カメラの真空槽もガラスエポキシ樹脂でシールドを支えている。2 つ目の気体分子による熱伝導は、装置内部が空気で満たされていると装置外部から内部に気体分子によって熱が伝わるため、装置内部を真空に保つ必要がある。要求される真空度は気体分子からの熱流入が

十分小さくできる 10^{-4} Pa 程度であり、さらに長期間安定した真空度が保てることが必要条件となる。3 つ目は真空槽内壁の常温部分からの熱輻射が冷却シールドで吸収される過程での熱流入である。これを避けるためには、冷却シールド外壁を電磁波の吸収を抑制するために研きあげ、さらにインシュレータを真空槽外壁と冷却シールド内壁の間に挟むと効果的である。可視赤外線カメラの冷却シールドは、内壁は赤外線に対しての吸収を有効にするために日本ペイント株式会社のニッペノバ 500 アストロブラックという特殊な塗料を用いて黒塗りしており、逆に外壁は光に対して吸収を受けにくくするようインシュレータでシールドを囲っている。図 6.2 にシールドをインシュレータで覆っている様子を示す。そして、図 6.3 に真空槽の真空冷却試験の結果のグラフを載せる。真空度は 10^{-5} 水準に達し、冷却温度は 100 K 以下に冷却できていることが分かる。

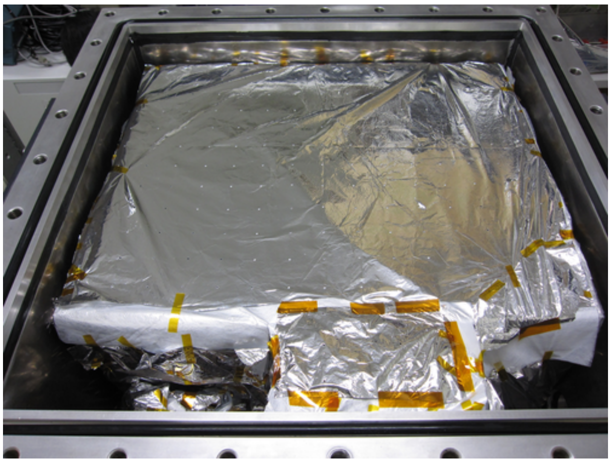


図 6.2: シールドをインシュレータで覆っている様子

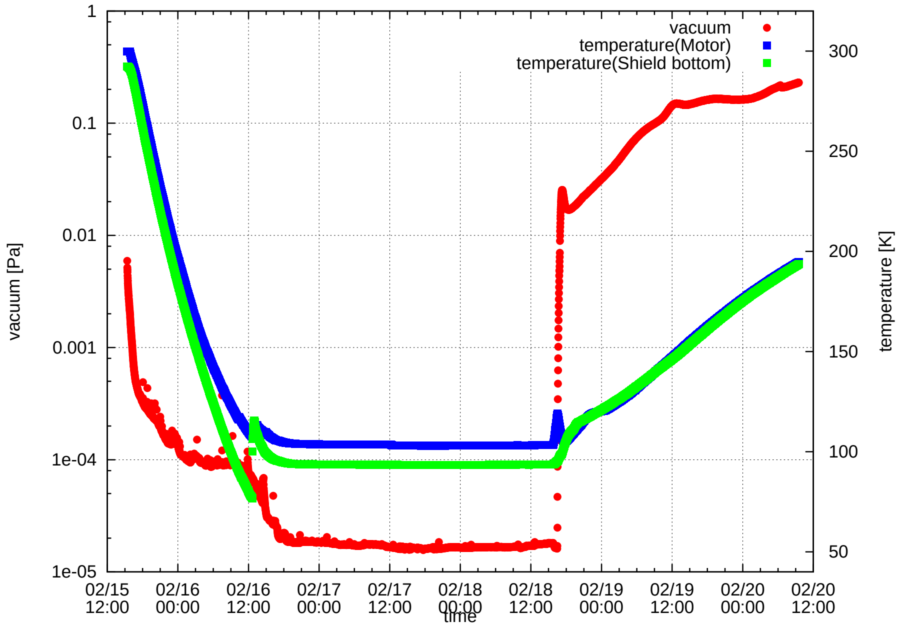


図 6.3: 真空槽の真空冷却試験 (内容物はモーター 1 つのみ)

6.2 温度モニターと温度制御システムの構築

100 K 以上での熱放射は赤外線が無視できなくなるため、赤外線観測装置において温度モニターは重要なシステムの１つとなる。また、検出器に関しても、HgCdTe 素子を用いている赤外線検出器は 80 K、Si 素子を用いている可視検出器はおよそ 170 K が最適温度となるため装置自身のモニタリングにとどまらず、検出器の温度制御も重要となる。装置の温度モニター用として Lakeshore218 を、検出器の温度制御用として Lakeshore331 を用いた。

Lakeshore218 および Lakeshore331 は Lakeshore 社が提供している温度モニターおよび温度コントローラで白金抵抗やシリコンダイオードを用いて、温度をモニターすることができる装置である。また、Lakeshore331 に関しては抵抗をヒーター用途として用いることで、要件温度の制御が可能なシステムとなっている。図 6.4 に用いた温度モニターと温度コントローラを、図 6.5 に用いた白金抵抗を、図 6.6 に検出器ケースに実際に配線した様子を示す。

「可視赤外線カメラ」には、温度モニター用センサーとして白金抵抗の 100 Ω を温度コントローラ用センサーとして白金抵抗の 1000 Ω を用いており、それぞれ 4 端子法における配線を施した。また、ヒーター用の抵抗として 15 Ω を用いた。また、観測装置は天文台の制御室から制御することが必須であるため、シリアル通信を用いて、制御マシンからの Lakeshore218 および 331 を制御するプログラムを C 言語を用いて開発した。HgCdTe アレイの場合、スイッチ回路部と素子部はインジウムで接合された構造となっているが、急激な冷却はインジウムを剥しかねないため、0.1 K/minute 程度での冷却が必要である (※冷却速度に明確な基準はない)。図 6.7 に「可視赤外線カメラ」用真空槽内での検出器の温度制御を行った際の時間-温度グラフを示す。VIRGO-2K に関しては 80 K を、CCD に関しては 170 K 付近を維持していることが分かる。また、図 6.8 に温度勾配のグラフを示す。VIRGO-2K、CCD ともに 0.1∼0.2 K/minute での温度制御ができていることが分かる。

図 6.4: 左:温度モニター Lakeshore218、右:温度コントローラ Lakeshore331

図 6.5: 白金抵抗 100 Ω および 1000 Ω
白金抵抗は格子振動による電子の散乱で抵抗が決まるため、15~90 K あたりで信頼性が高い。

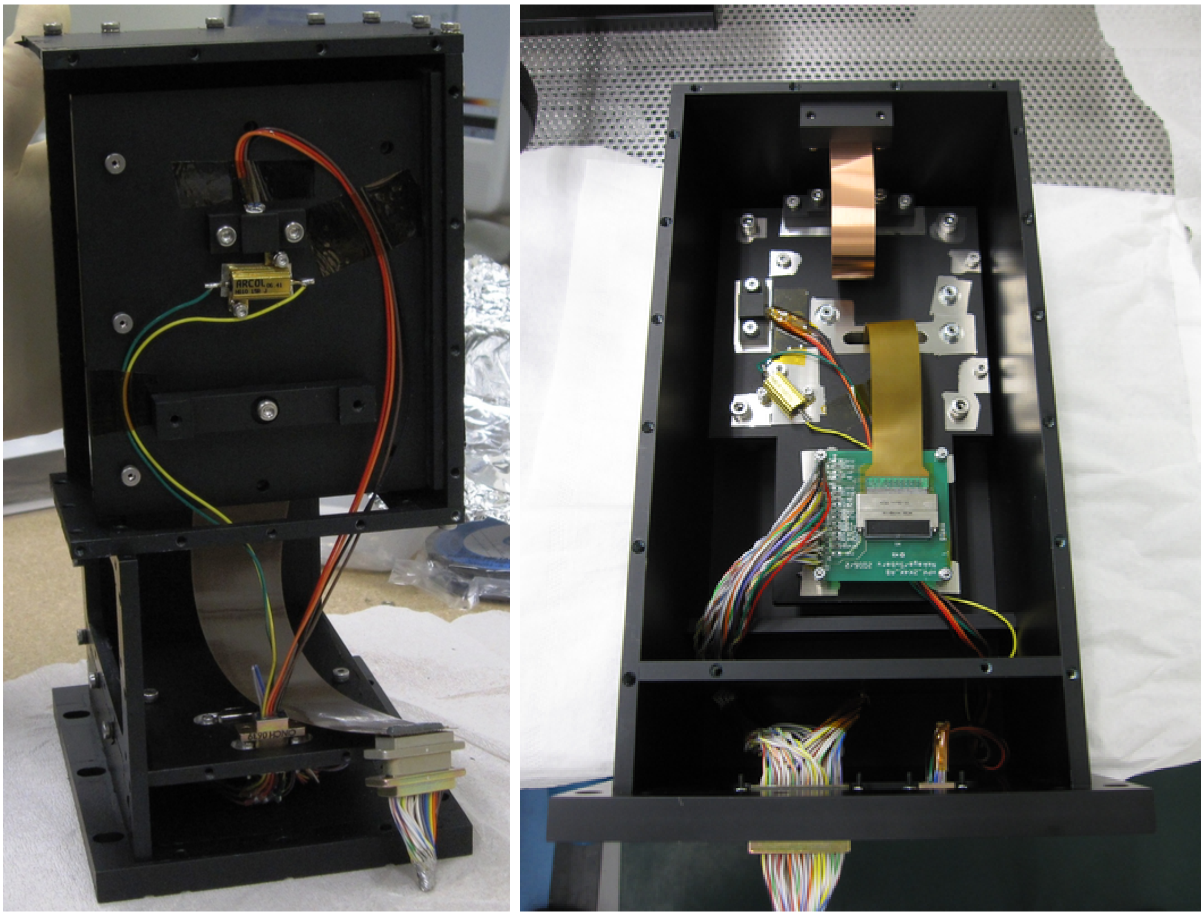


図 6.6: 検出器ケースに配線した白金抵抗とヒーターの様子 (左:VIRGO-2K、右:CCD)

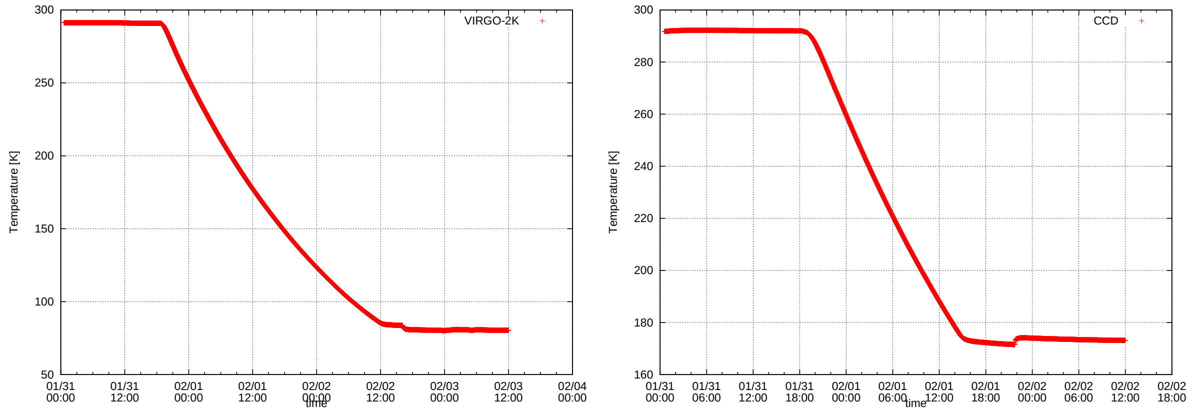


図 6.7: 時間-温度グラフ (左:VIRGO-2K、右:CCD)

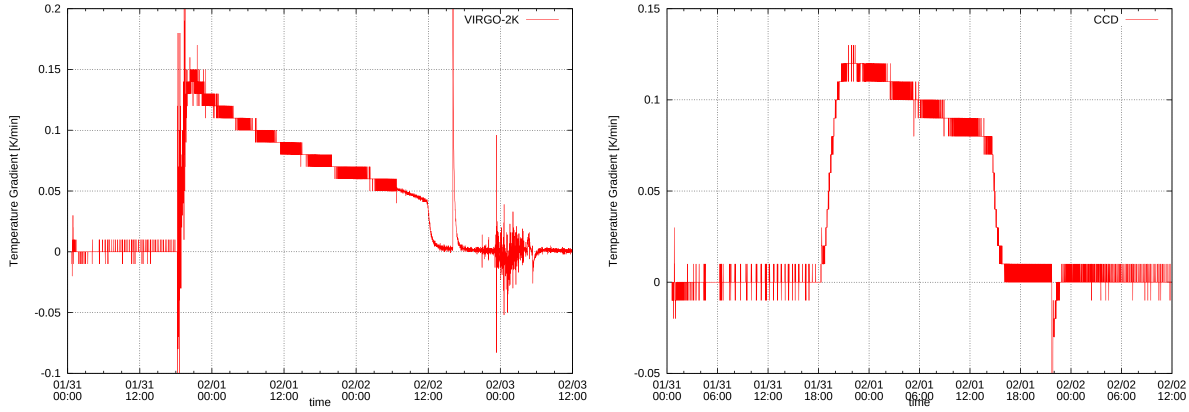


図 6.8: 時間-温度勾配グラフ (左:VIRGO-2K、右:CCD)

6.3　レンズの偏心調整

6.3.1　レンズの特性:偏心・傾き

レンズの面はある曲率半径を持っており一様な球面である。そのため、レンズが傾いていたとしても、その面は結局同じ曲率であるため光学上ではレンズの傾きと判断できない。むしろ、傾いたことにより光学上ではレンズ面の中心が光軸に垂直な面に対して平行移動したことと同義となる (図 6.9)。仮に、測定から光軸のずれが分かったとしても、それがレンズの偏心によるものなのか傾きによるものなのかの判断ができない。以上より、レンズの調整は様々なパラメータが入ってくるため、非常に難しいものとなる。

今回の調整では、軸ずれを測定した後、偏心によるずれという仮定から調整を行い、それでも調整できなかった場合は、傾きを考慮した調整を行った。レンズの調整は、(株) レンズ屋に設計を依頼した資料 (参考文献 [27]) をもとに行った。

6.3.2　冷却によるレンズおよび鏡筒の収縮

レンズの偏心調整における赤外線観測装置特有の問題として、冷却によるレンズおよび鏡筒の収縮が挙げられる。可視光観測装置の場合、レンズ系は冷却する必要がないため常温における偏心

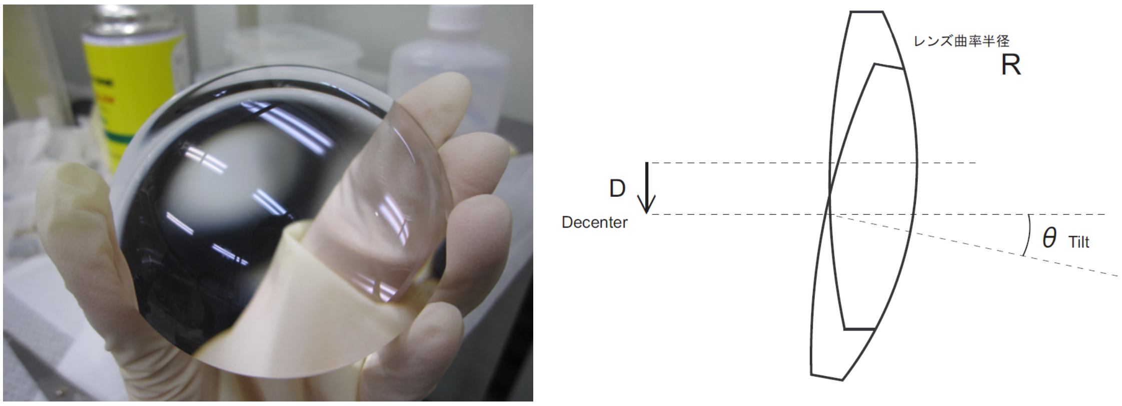


図 6.9: 右:「可視赤外線カメラ」に用いるレンズの例、左:レンズの傾きと偏心

調整を注意深く行えばよいが、赤外線観測装置の場合はレンズ系はクライオスタット内に投入するため、冷却後による効果に関して考慮に入れる必要がある。「可視赤外線カメラ」では、鏡筒に用いているのはアルミであるが、熱収縮はレンズに比べアルミの方が大きいため、鏡筒に対してレンズの固定しろにあそびがないと、冷却の際にアルミに押されレンズを割ってしまいかねない (図 6.10)。また、逆にあそびが大きすぎるとピントがずれる。これらの解決策としては、レンズを強すぎない力で押した状態を維持する方法がある。「可視赤外線カメラ」のレンズ系の固定方法として、下部の 2 点を固定ネジで固定し、上部 1 点はバネネジを用いて固定する方法を用いた。また、レンズの正面方向に対しても冷却による収縮が起こるため 8 点のバネネジで抑えた (図 6.11)。

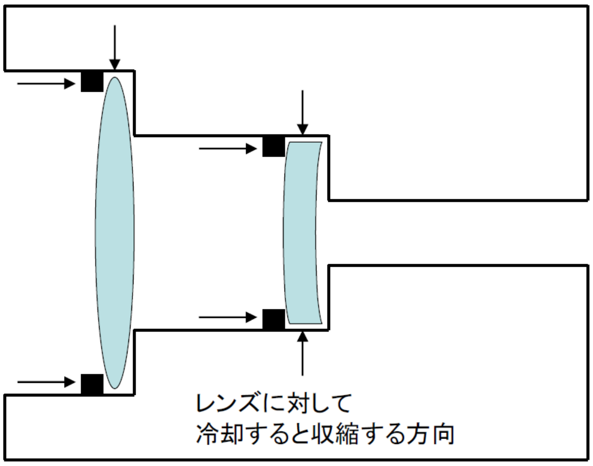


図 6.10: 冷却による鏡筒の収縮方向

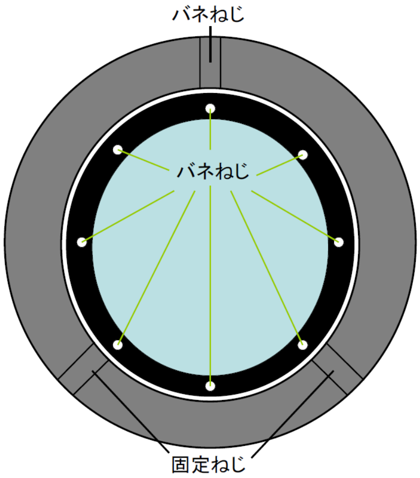


図 6.11: レンズの固定ネジの位置

6.3.3　オートコリメータを用いたレンズの偏心調整

レンズの偏心調整の手法として、平行光を測定したいレンズに照射し、レンズの反射を利用して偏心を測定する方法がある。この際、測定したいレンズ面と垂直な方向に光を入射させるよう、平行光を作り出すオートコリメータと測定したレンズとの間に適当な位置に調整用レンズを挟む。図 6.12 に実際に用いた測定機器のセットアップを示す。仮に、レンズが傾いていなかった場合、レンズを入射光軸に対して回転させたとしても反射した光は常に同じ光路をたどり、オートコリメータ上では回転は生じない (図 6.13 の左図)。しかし、レンズが傾いていた場合、同じように平行光を入射させても、レンズに反射して返ってくる平行光は、レンズ面の傾きに応じた傾きを持つ。この状態で、レンズを入射光軸に対して回転させると、平行光は入射光軸に対してある半径の円で回転する (図 6.13 の右図)。この半径をオートコリメータで測定することでレンズ面の偏心を調べることができる。

平行光をレンズ面と垂直な方向に入射させるための調整用レンズの位置は、1 枚のレンズの場合、調整用レンズの焦点位置から測定したレンズの曲率半径の位置に置けばよいが、複数のレンズの場合は複雑となる。そこで、複数のレンズの場合の計算方法として、「ZEMAX」というシーケンシャル光学系における光線追跡が可能なソフトを用いた。以上の計算の上で、偏心調整したレンズ系の測定結果を付録 D に載せる。そして、調整したレンズ系 (コリメータレンズ、赤外線カメラレンズ、可視光カメラレンズ) を図 6.14 に載せる。

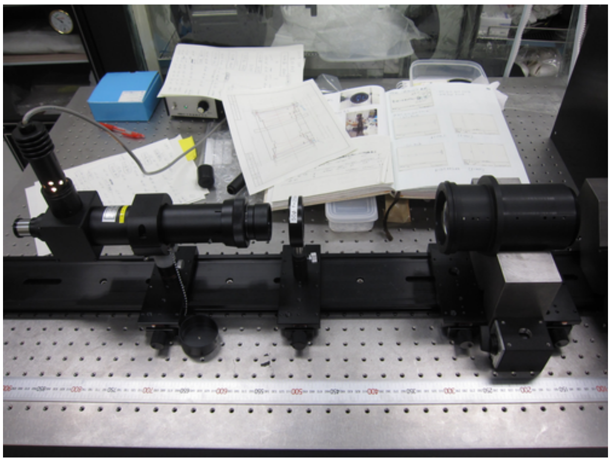


図 6.12: オートコリメータによるレンズの偏心調整の様子

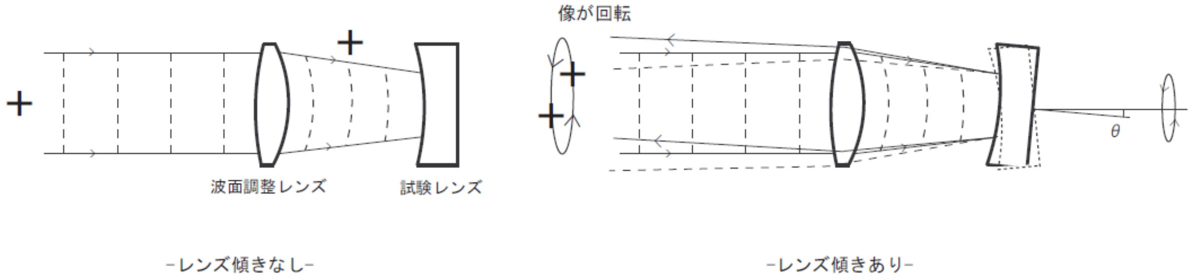


図 6.13: レンズ偏心測定法

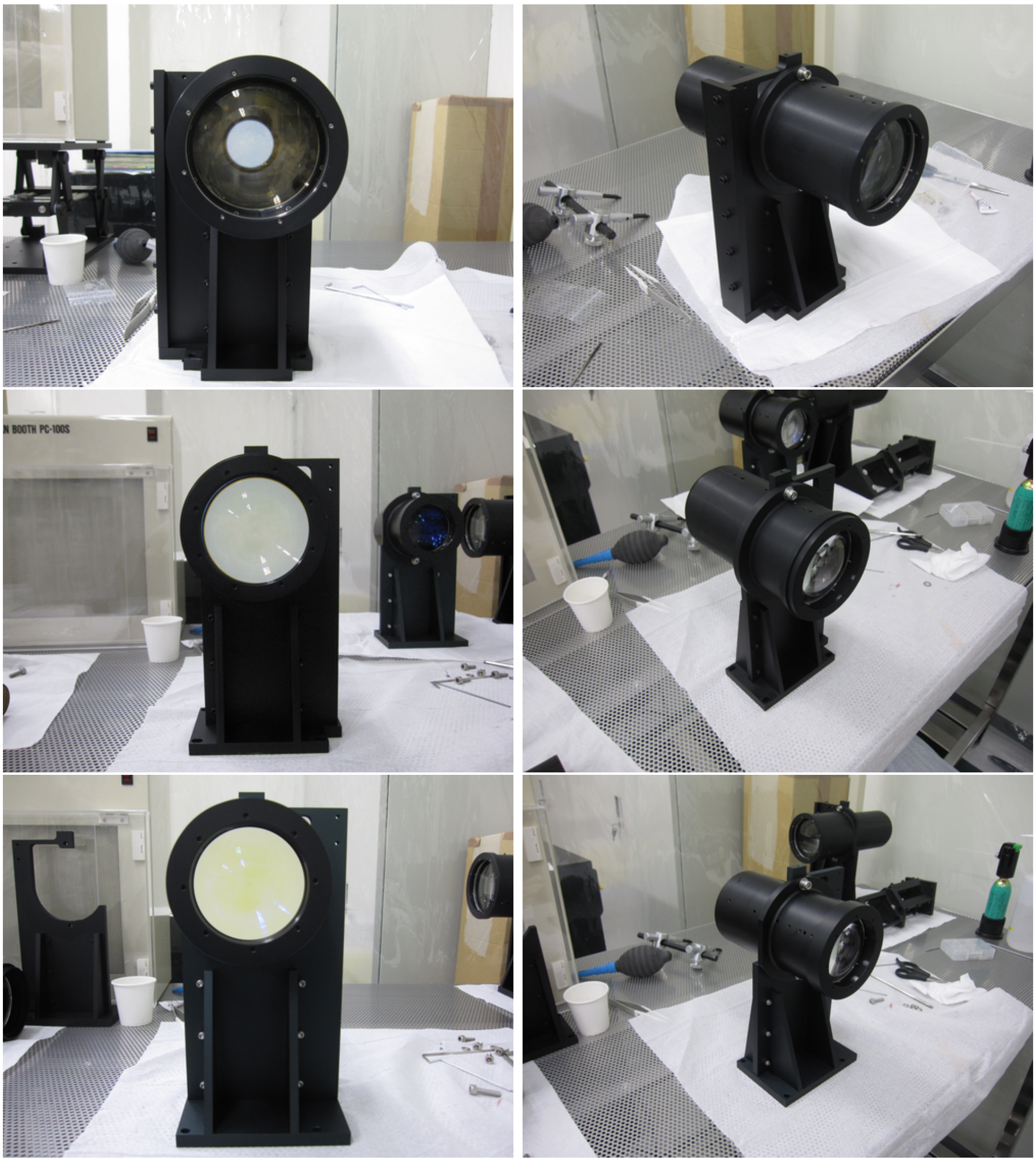


図 6.14: 鏡筒に挿入したレンズ
上から、コリメータレンズ、赤外線カメラレンズ、可視光カメラレンズ

6.4 真空冷却試験

以上、ホイール・レンズ・温度センサ・検出器 (8 章で述べる) が一通り揃ったため、真空槽に全てのコンポーネントが入った状態で真空冷却試験を行った。図 6.15 に現在揃っているすべての部品を真空槽に入れた様子を載せる。2009 年 1 月 31 日現在、初のすべてのコンポーネントを入れた状態の試験であり、出ガス対策が不十分な状態での試験となった。1 月 31 日から 2 月 6 日までの真空度と冷却温度のグラフを図 6.16 に載せる。これを見ると、真空槽内の光学定盤は 65 K まで冷却されており、また冷凍機ヘッドから最も遠い位置のシールドの温度でも 90 K まで冷却されていることを確認したため、問題ないことが分かった。ただし、真空度に関しては今回は 10^2 Pa 程度までしか下がらなかった。さらに、真空ポンプのバルブを閉じることで真空保持試験を行った結果を図に載せる。2 時間で真空度は 2 桁上昇し、1 Pa を越える結果となってしまった。これは、長期運用が必須である観測装置としては致命的な結果となってしまった。内部の出ガスか真空洩れのどちらかに限られるが、まだ原因が分かっていないため、今後の課題となる。

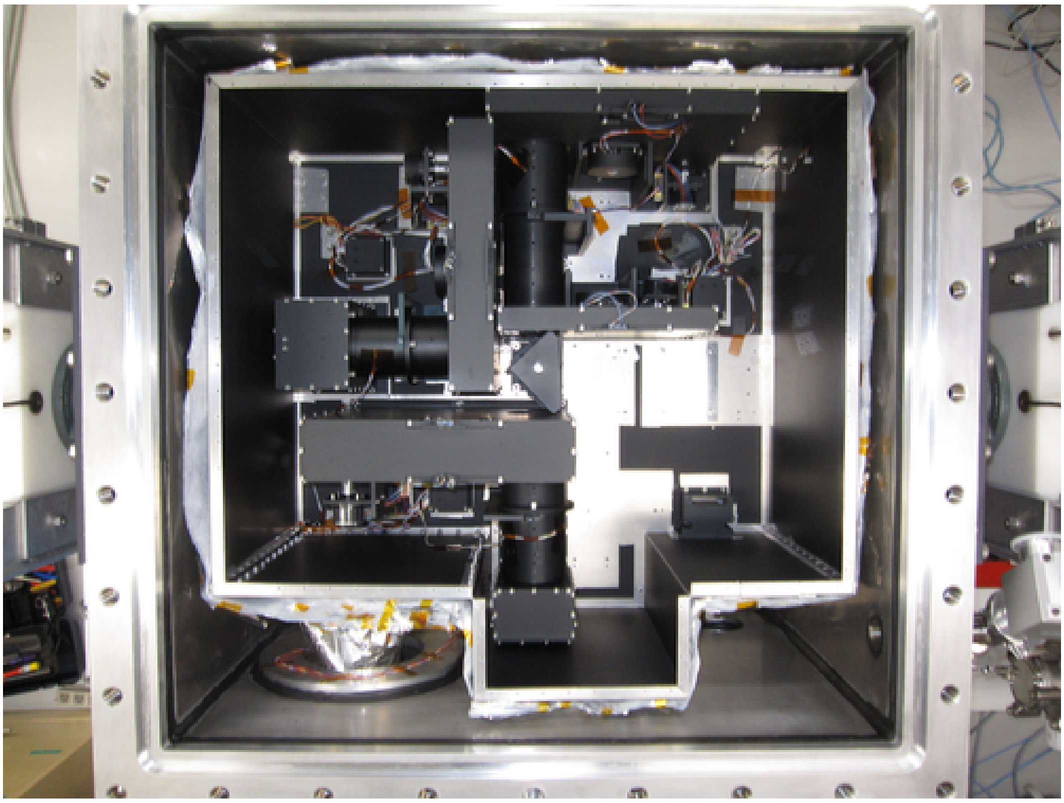


図 6.15: 真空槽にすべてのコンポーネントを入れた様子

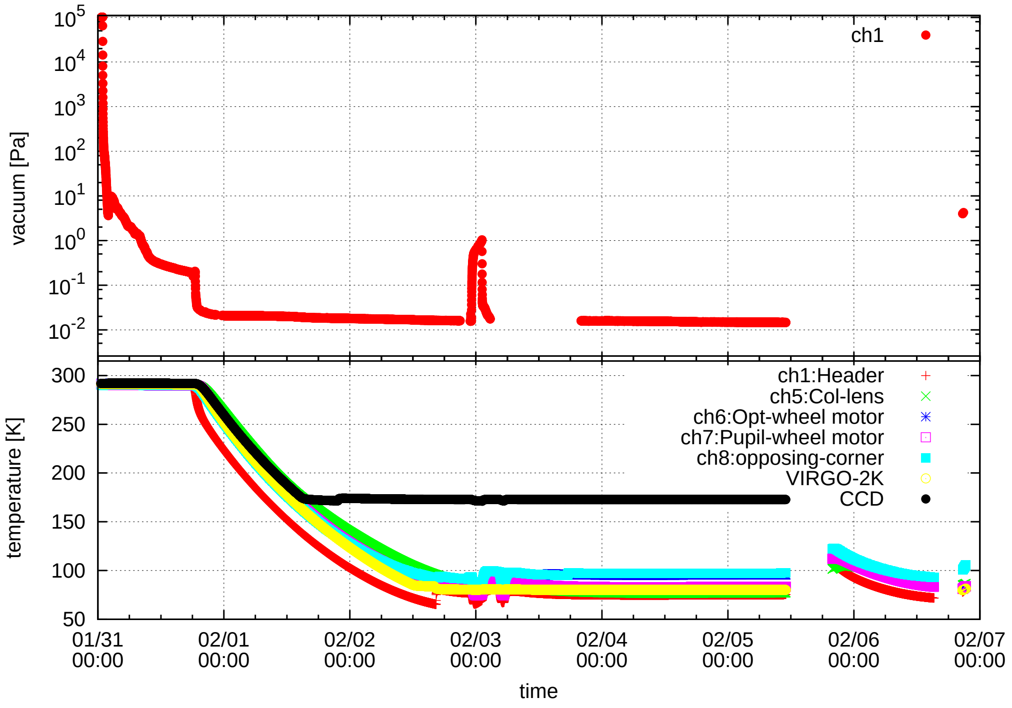


図 6.16: 真空冷却試験

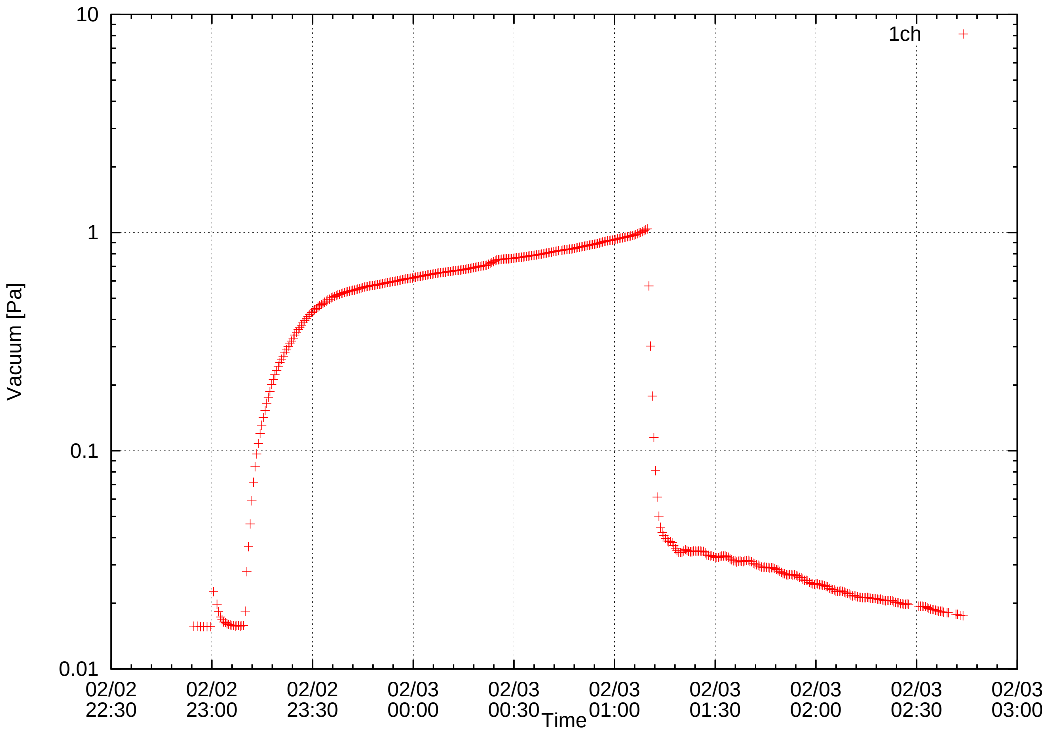


図 6.17: バルブを閉じた状態で真空保持試験

第7章　ファーストライト

7.1　「かなた」望遠鏡への搭載

2009 年 2 月 6 日、「可視赤外線カメラ」を初めて「かなた」望遠鏡に搭載した (図 7.1)。その日の天候は良好であったため、ファーストライトも同時に成功した。そのときに取得した画像を図 7.2 に載せる。撮った天体はオリオン大星雲 (M42) である。以下、現在の調整での「可視赤外線カメラ」の結像性能と効率について述べる。

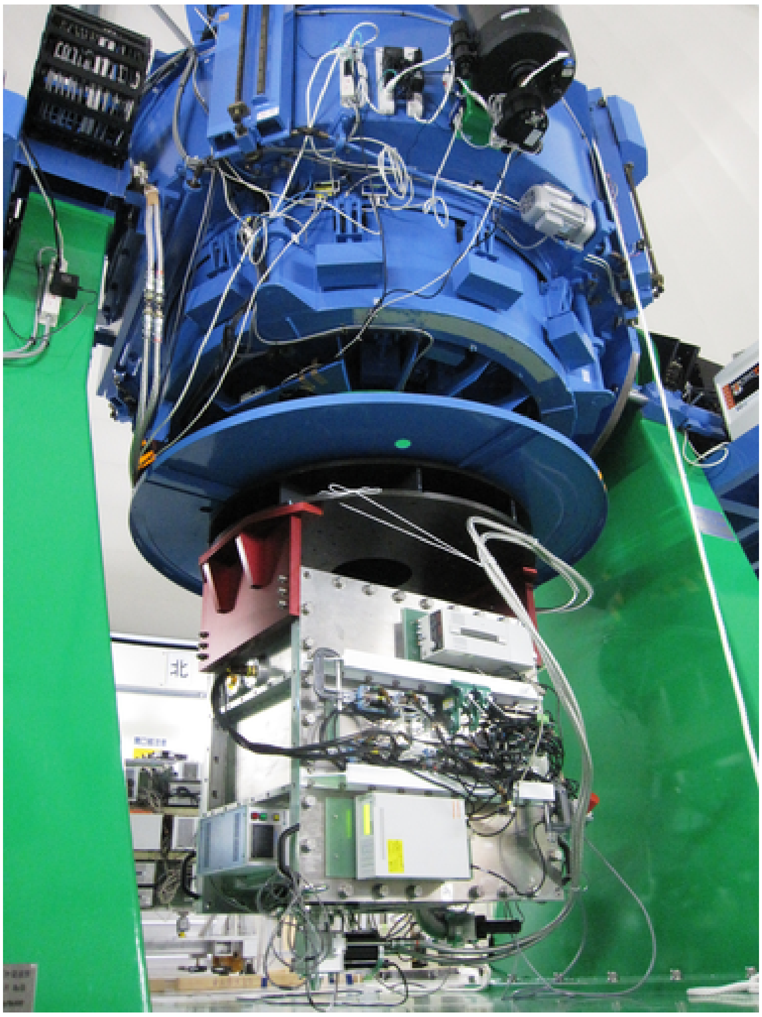


図 7.1: 「可視赤外線カメラ」を「かなた」に搭載した様子

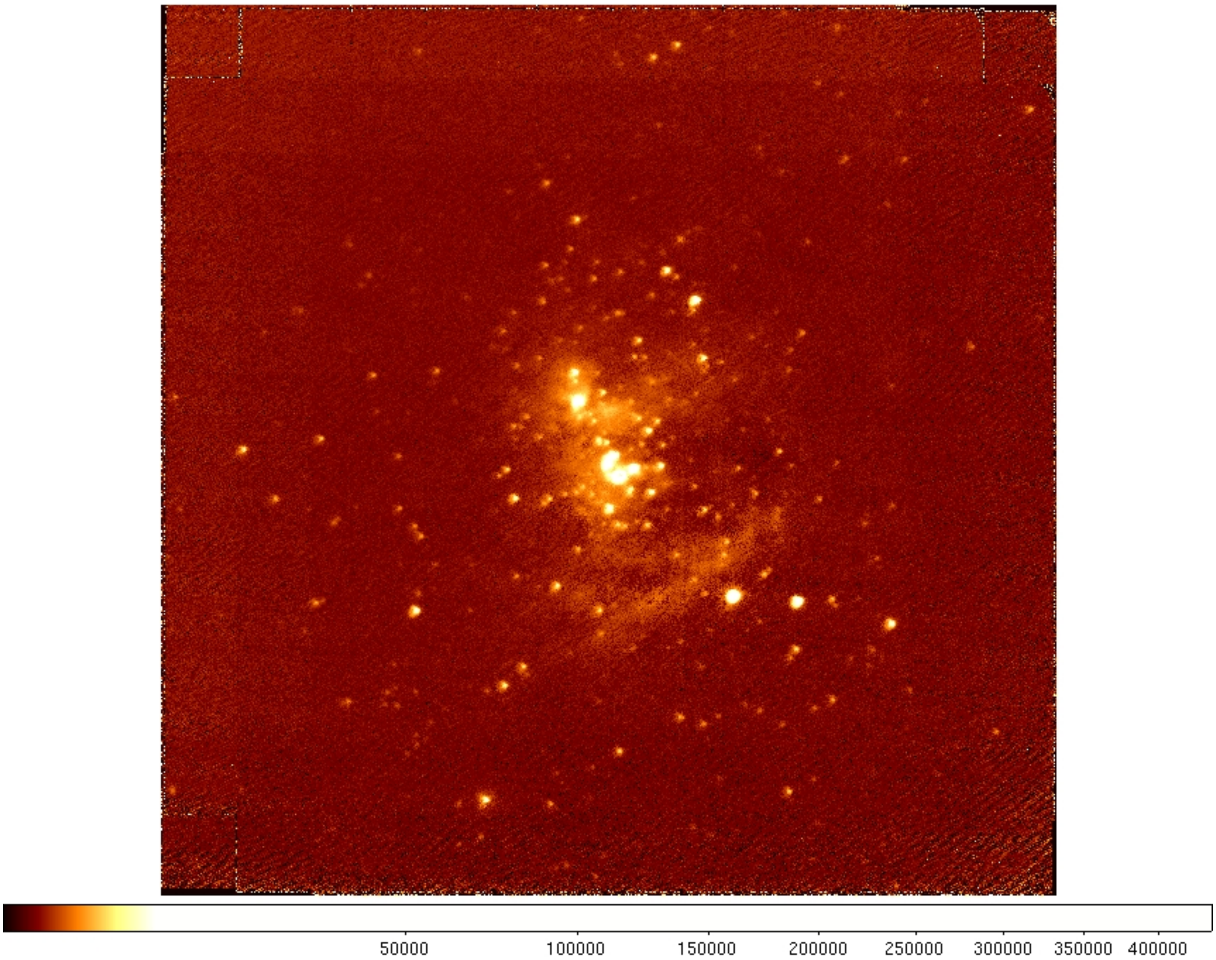


図 7.2: 「可視赤外線カメラ」で撮ったオリオン大星雲

7.2 結像性能

東広島天文台のある福成寺付近のシーイング値はおよそ 1.2 ” である (千代延卒論 [45] を参照)。よって、目指す「可視赤外線カメラ」の Point Spread Function(PSF) の半値幅は、1.2 ” 前後となる。今回は、初の望遠鏡の搭載ということもあり、光学系の今後の厳密な調整のための観測という意味合いで観測に望んだ。2 月 6 日、7 日の 2 日間の中で最も PSF の半値幅が良好であったデータを図 7.3 に載せる。半値幅は、およそ 5.5 ピクセルという値を記録した。「可視赤外線カメラ」のピクセルスケールは 0.29 ”/pix なので、シーイングサイズは 1.65 ” と良好な値が得られた。しかし、典型的にはシーイングサイズは 3 ” を越えており、結像性能はまだ改良の余地がある結果となった。

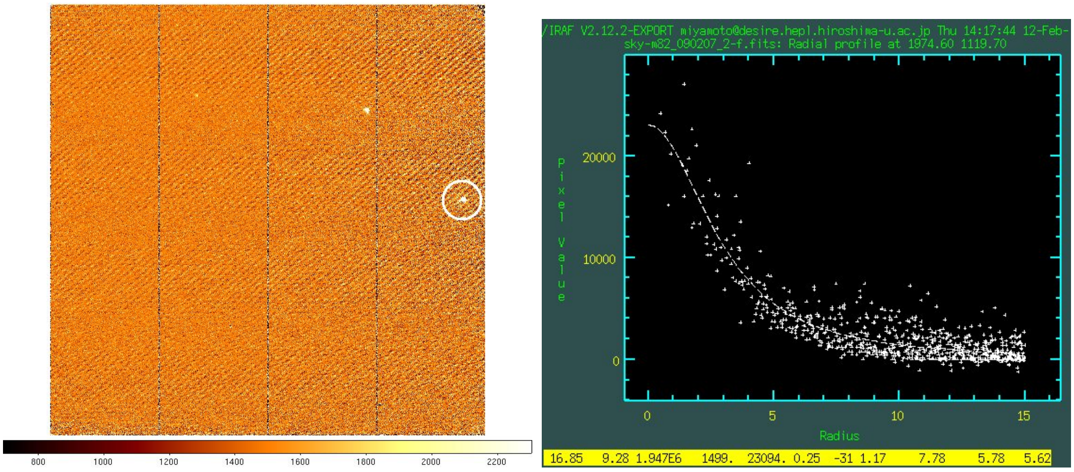


図 7.3: 最良星像サイズの例

また、副鏡をずらすことでシリウスをぼかし、検出器の 9ヶ所についてケラレを調べた。図 7.4 は各ピクセルごとに取得した画像 9 枚を重ね合わせたものである。この図を見ると、位置によりケラレ方が異なることが分かる。このケラレは、望遠鏡のローテーターの回転と同期して回転したため、カメラ内部ではなくカメラの外側に何かしらの原因があることが分かった。ちなみに、それぞれの画像は、共通して上側がケラレているが、これはひとみホイールによるケラレであることが後に分かったため、ひとみホイールを回転させることでケラレはなくなった (図 7.5)。

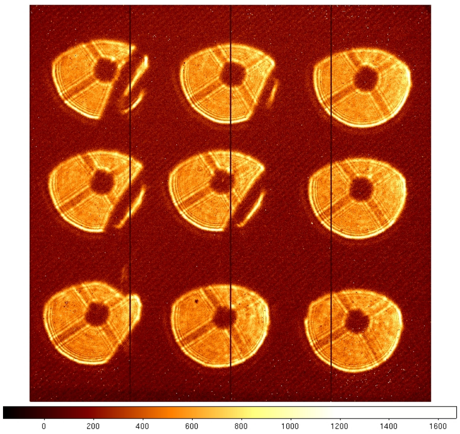


図 7.4: シリウスをぼかしたときの画像

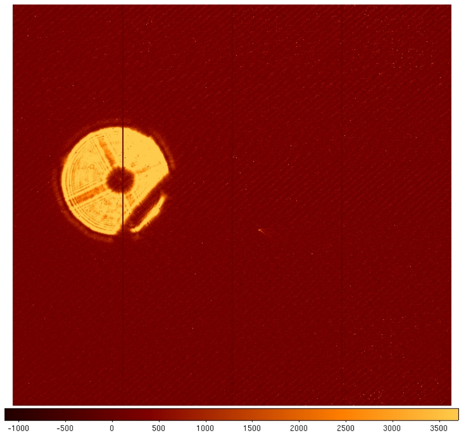


図 7.5: ひとみホイールの影響がない画像

7.3 標準星 HIP43587 を用いた効率の評価

天体の明るさは、大気や望遠鏡の鏡、カメラ内のレンズ、そして検出器の量子効率により損失を受ける。装置開発の際は、レンズや検出器の量子効率等を考慮した上でなるべく効率を稼ぐ努力をする。実際、「可視赤外線カメラ」に用いられているレンズは、表面反射を防ぐため光学素子の表面に反射防止膜を蒸着している。コリメータレンズと赤外線カメラレンズに単層 MgF_2 コートを蒸着した場合の透過率を示す。このような効率を実際に調べておくことは、高感度を目指す「可視赤外線カメラ」にとっては重要である。このような効率を調べるため、あらかじめ明るさが分かっている標準星を用いる。今回は、HIP43587(図 7.6) という天体を用いて効率を計算した。

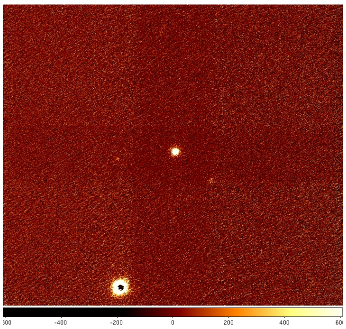


図 7.6: 標準星 HIP43587

望遠鏡の主鏡で受け取る星の明るさ N [e^-/sec] は、

$$N = \frac{A\lambda F_\lambda \Delta\lambda}{hc} \tag{7.1}$$

と表すことができる。ここで、A は望遠鏡の集光面積、$\Delta\lambda$ は観測波長幅、h はプランク定数、c は真空中の光速度である。「かなた」の鏡の有効径は 1.5 m、Ks バンドの中心波長 2.157 μm、観測波長幅 0.32 μm であるから、星からの明るさは 6.85×10^7 e^- となる。観測した HIP43587 は、Aperture 測光によりおよそ 52 万 ADU/sec と出たため、ゲインを 3.4 e^-/ADU(8 章コンバージョンファクタ参照) と想定した場合、およそ 180 万 e^- という結果となる。よって、効率は 2.6 %である。

コリメータレンズと赤外線カメラレンズの透過率が図 7.7 からおよそ 45 %であり、さらにダイクロイックミラーやウィンドウ、フィルターや望遠鏡の鏡、そして検出器の量子効率を考慮に入れた場合でも少なくても 20 %前後は性能として出てほしい。だが、今回はその 1/8 という結果となってしまった。ケラレの影響はあるものの、効率はあまりにも悪いため今後調べる必要がある。

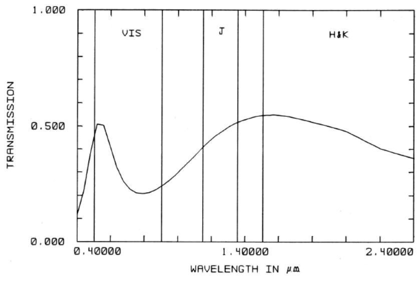


図 7.7: コリメータ+IR カメラの透過率

第8章　実験室および「かなた」望遠鏡搭載時の検出器の性能比較

8.1　VIRGO-2K の制御方法

検出器の性能評価に入る前に、VIRGO-2K の制御方法についてまず述べる。VIRGO-2K を制御するためには、MESSIA5 から VIRGO-2K 用のクロックおよび ADC のトリガー用クロックの作成が必要となる。2006 年度宮本卒論にて、マルチプレクサパッケージの読み出しについて論じたが、サイエンスグレードの読み出しの際、これまで使用したファイルやスクリプトにいくらかの変更が生じたため、新たにここで説明する。なお、完全空乏型 CCD については割愛する。

8.1.1　VIRGO-2K のクロックパターンとクロック作成

VIRGO-2K の大きな特徴の 1 つとして、クロックインターフェースが非常に簡略化されているということが挙げられる。図 8.1 の 4 出力モードのクロックパターンに示すように、VIRGO-2K の駆動のためには、2 つのクロックと 3 つの制御ラインの計 5 つの信号のみ入力させればよく、シフトレジスタの操作とリセット操作に必要なクロックはすべてマルチプレクサ内で作られるしくみとなっている。図 8.2 は実際に送っているクロックの様子と、検出器出力信号の波形の様子をオシロスコープで見たものを載せる。VIRGO-2K に送る信号は、マスタークロックの pmc と読み出しを制御する FrameStart、出力数を 4 と 16 のどちらかに選択できる reduceOut、リセットモードを Row-by-Row モードか Global モードのどちらかに選択できる ucRstSel、フレームのリセットを制御できる ucRstEn、という役割を持っており、制御ラインを変更すれば、出力モードやリセットモードが容易にできる。この度の実験では、出力モードは 4 でリセットモードは Row-by-Row を使用した。

クロック作成のためには、cpg.ascii ファイルと spv.ascii ファイルを作成する必要がある。cpg.ascii ファイルはクロックの最小単位を作成するためのファイルで、spv.ascii ファイルは cpg.ascii ファイルで記述したパターンの最小単位を組み合わせてクロックパターンを記述するためのものである。この 2 つファイルをコンパイルし MESSIA5 に読み込ませることで、検出器を駆動させるためのクロックを発生させることができる。実際に作成した cpg.ascii については付録 B.1 を、spv.ascii については付録 B.2 を参照していただきたい。

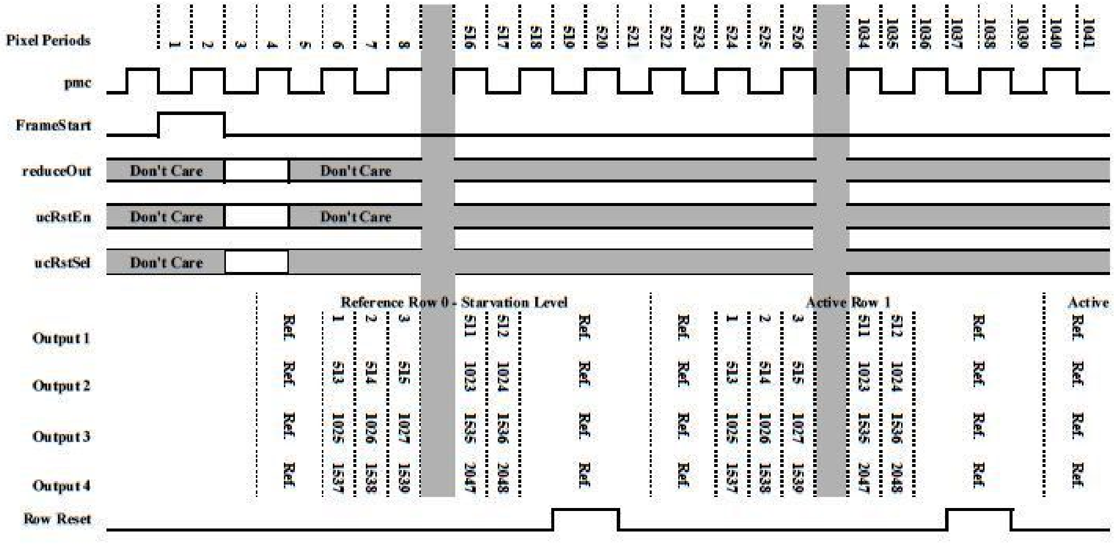


図 8.1: 4 出力モードのクロックパターン

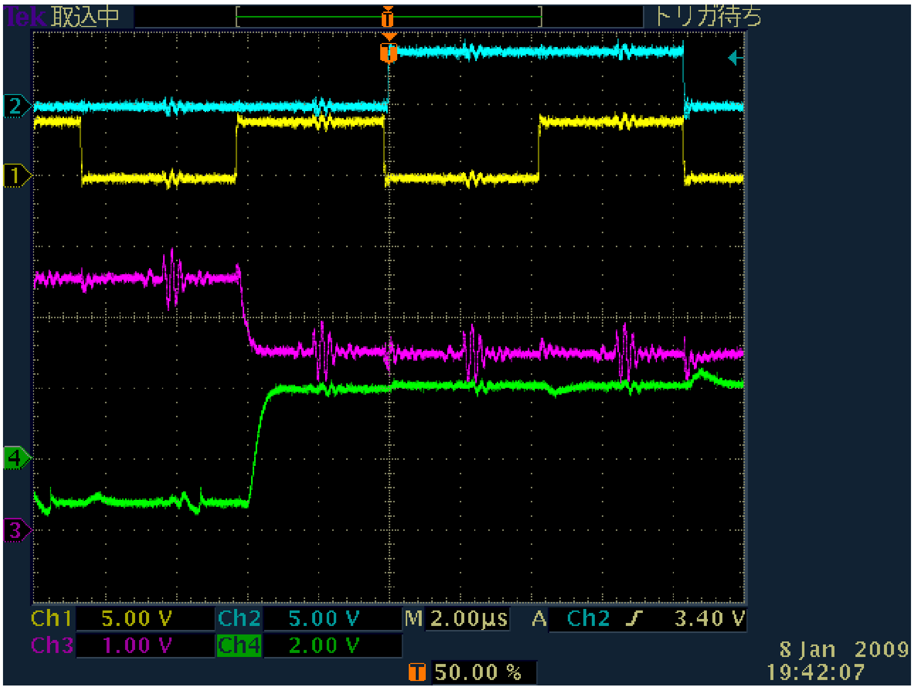


図 8.2: 実際に送っているクロックの様子
1ch:pmc、2ch:FrameStart、3ch: 検出器出力信号、4ch:ADC 入力前の信号

8.1.2　残像と対策用クロック

「可視赤外線カメラ」に用いる VIRGO-2K の module49 は、図 8.3 に示すように特有の残像を残すことが後に分かった。図 8.4 は、図 8.3 の黒い四角で示した計 10000pix の領域において残像の影響が完全になくなるまでの時間経過をプロットしたものである。完全に影響をなくすには 15 分以上かかることが分かる。残像の影響を少なくする方法として、VIRGO-2K のバイアスラインである vloReset ラインをクロックに取り込むことで、読み出す直前まではリセットを常に ON の状態にし、常にリセット状態にしておく方法を取った。つまり、現在 VIRGO-2K のクロックパターンとして計 6 つの信号を入力している。付録 B.1.3 に残像対策用クロックの cpg.ascii を、付録 B.2 に残像対策用に新たに作成した reset_always と no_reset のループパターンを載せる。

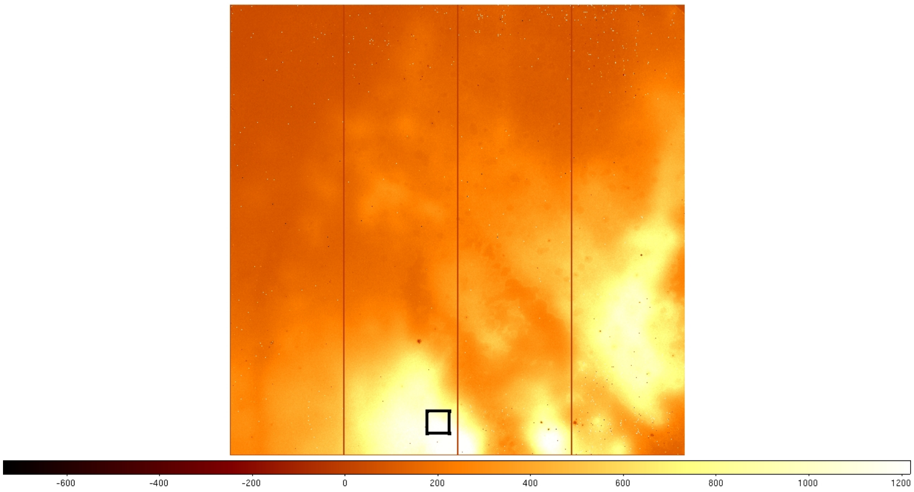


図 8.3: VIRGO-2K モジュール 49 の残像パターン (対策前)

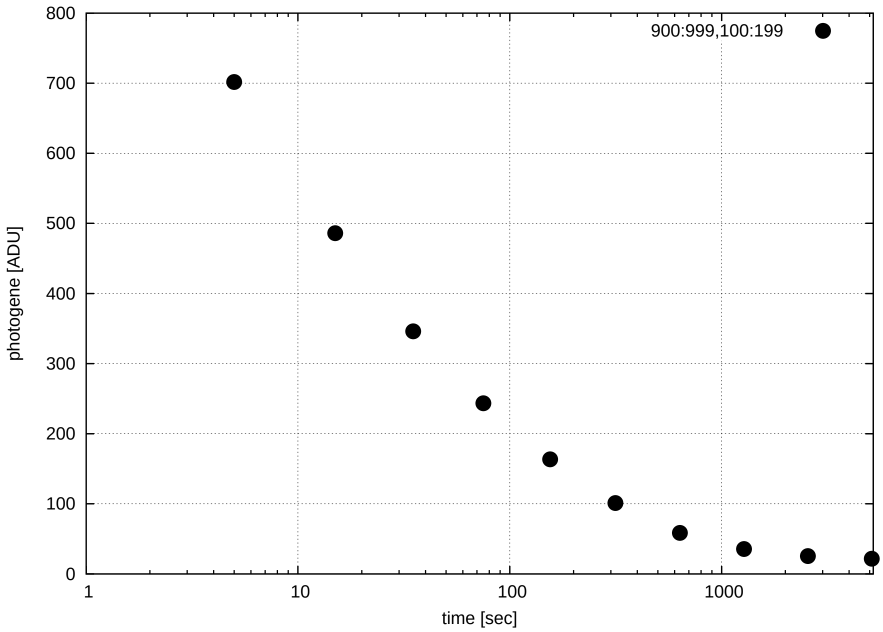


図 8.4: 時間と残像レベルのグラフ (対策前)

8.2 実験室における VIRGO-2K の性能評価試験

8.2.1 テスト用デュワー

図 8.5: VIRGO-2K の試験に用いたデュワー

VIRGO-2K サイエンスグレードの性能評価試験のため、国立天文台先端技術センターのテスト用デュワーを用いた (図 8.5)。このデュワーの詳細な情報は、2006 年度宮本卒論を参照いただきたい。図 8.6 は、VIRGO-2K をデュワー内に設置した様子と検出器の試験に用いた光源を示す。光源は、黒体を用いヒーターによる温度制御で赤外線源を調節できるようセットアップした。図 8.7 は、この試験のセットアップの全体像である。

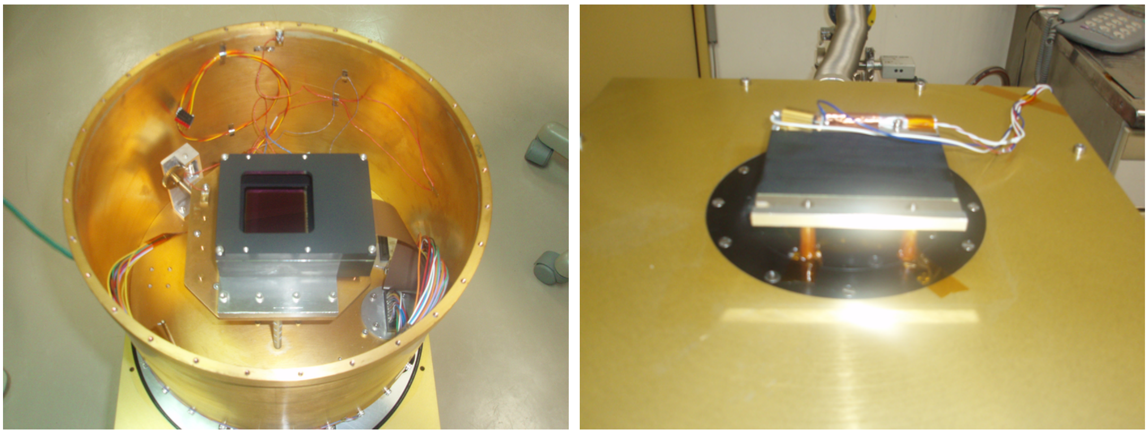


図 8.6: デュワー内に置いた VIRGO-2K の様子と試験に用いた光源

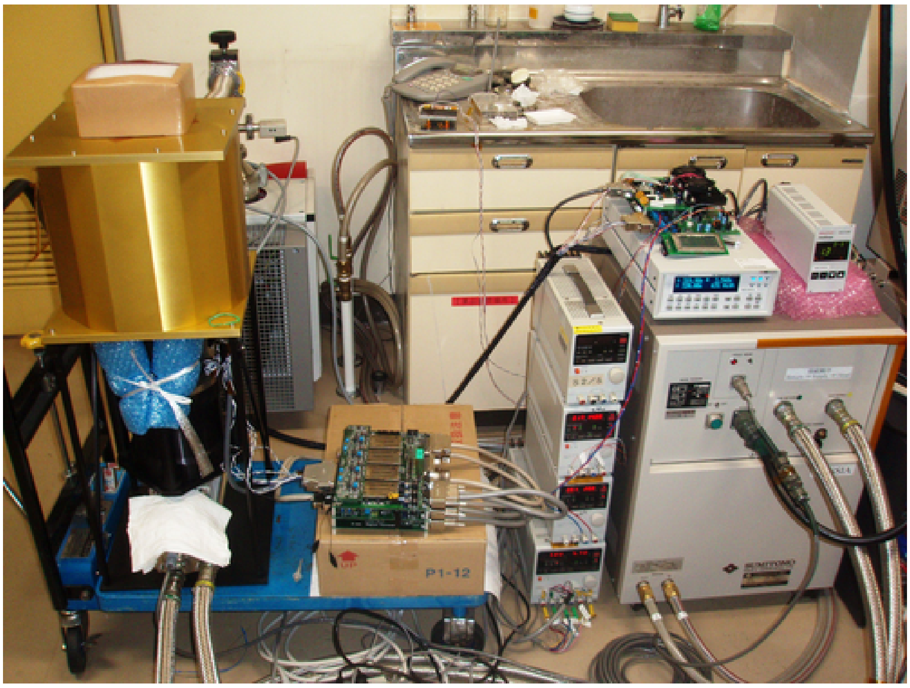


図 8.7: 試験全体像

8.2.2 コンバージョンファクタと読み出しノイズ

ノイズの測定を行う場合、同じ露出時間をかけた 2 枚の画像の差し引きした画像のある領域における標準偏差の $\sqrt{2}$ で割ったものをノイズとすることができる (Howell,2000)。ただし、このノイズには検出器の読み出しノイズに加え検出器に蓄積された電荷の揺らぎの成分が含まれるため、全ノイズは

$$n_{total} = \sqrt{n_{read}^2 + n_e^2} \tag{8.1}$$

と表せる。ここで、n_{read} は検出器および読み出し回路を含めたノイズ成分、n_e は検出器に蓄積された電荷の統計的ゆらぎの成分、n_{total} は実際に測定されるノイズである。n_e には検出器に蓄積されている電荷数 N_e [e^-] との間に、

$$n_e = \sqrt{N_e} \tag{8.2}$$

の関係があり、式 (8.1) と式 (8.2) を用いて式を変形すると、

$$n_{total}^2 = \frac{N_e}{C_f} + n_{read}^2 \tag{8.3}$$

となる。ここで、C_f とはコンバージョンファクタあるいはゲインと呼ばれる値で、検出器出力信号の AD 変換後の値 1ADU(analog to degital unit) あたりの電荷数を表す量で、単位は electron/ADU である。この値は、ADC 前のアナログ信号値を知る上で重要なパラメータであり、ノイズの評価等には欠かせない。

VIRGO-2K の読み出し系におけるコンバージョンファクタを調べるため、320 K ブラックボディを一様な光源として用いてピンホールを通して赤外線を照射し、同じ露出時間で 2 枚連続で画像を取得した。サンプリングは、CDS を用いた。解析には、露出時間 240 秒まで 3 秒おきに取得した画像 80 枚 ×2 の計 160 枚の画像を用いた。図 8.8 は実際に取得したイメージで、四角で囲んだ領域計 10000 ピクセルをコンバージョンファクタの解析に用いた。図 8.9 は、検出器出力信号 (ADU)

と測定のノイズの 2 乗したもの (分散) をプロットしたグラフである。このグラフを、1 次式を用いて 2000 から 20000 ADU までフィッティングした結果、傾きは 0.297 と出た。コンバージョンファクタはこの逆数なので、3.4 e^{-}/ADU となる。そして、MACS2 の ADC の電圧レンジ 0-10 V と増幅回路のゲイン 10.2 から 15 $\mu\mathrm{V}/\mathrm{ADU}$ と出るので、ノードセンシティビティは 4.4 $\mu\mathrm{V}/e^{-}$ という値となる。この値は、module49 のスペックの 4.3 $\mu\mathrm{V}/e^{-}$ とほぼ同等であるのでこの計測は妥当であることが分かった。

また、式 (8.3) から切片が読み出しノイズを表すことが分かるので、フィッティングの結果から考慮すると CDS での読み出しノイズはおよそ 25 e^{-} だということが分かる。Fowler Sampling による読み出しノイズの評価については、後で述べることにする。

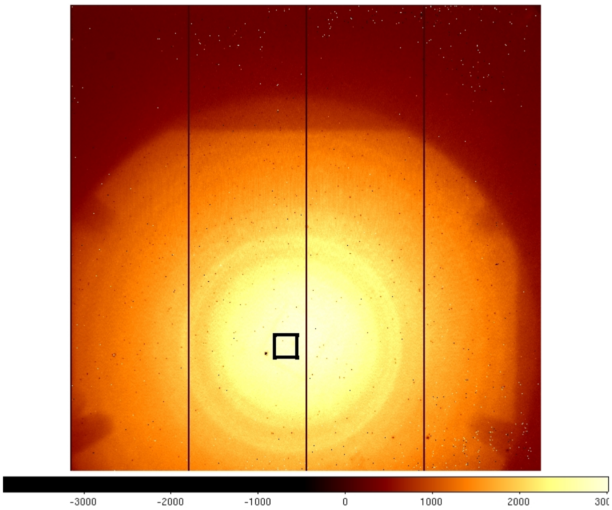


図 8.8: 検出器に光源を当てた時のイメージ
黒い四角の領域 10000 ピクセルをコンバージョンファクタとリニアリティの解析に用いた。

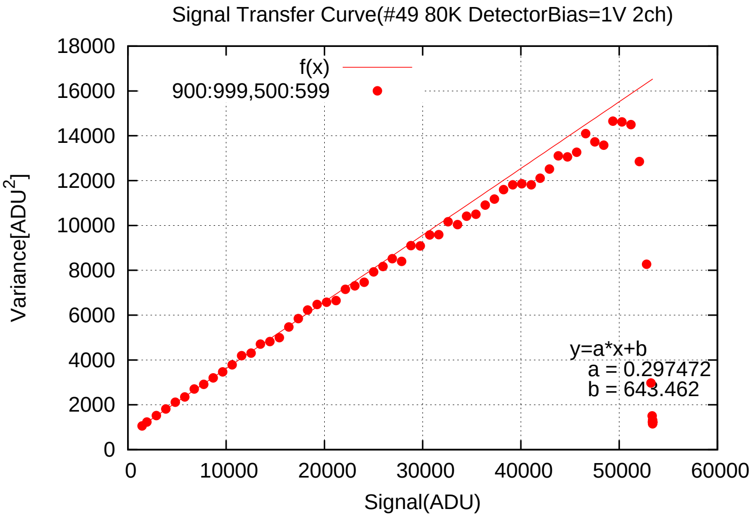


図 8.9: 出力信号と分散の関係

8.2.3 リニアリティ

検出器に入射する光子量と検出器のキャパシタンスに蓄積される電荷量の間には、ある程度までは線形性 (リニアリティ) が保たれるが、1 画素に蓄積される電荷量には限界があるため、徐々に線形性から外れていき最終的に飽和電荷量に達する。精度良い観測をするとなると、精度の高いリニアリティが成り立つ検出器出力信号の値を把握しておく必要がある。

リニアリティの測定の際は、光源として 320K ブラックボディを用い、ピンホールを通して赤外線を照射した。測定では、露出時間 240 秒まで 3 秒おきに取得した計 80 枚の画像を取得した。サンプリングは、CDS を用いた。リニアリティの評価では、コンバージョンファクタの算出に用いた画像と同様図 8.8 の黒い四角で囲んだ計 10000 ピクセルの画像を用いた。図 8.10 の左のグラフは、露出時間と検出器出力信号の関係をプロットしたグラフである。そして、このグラフの 0 秒から 80 秒について一次式でフィッティングを行い、検出器出力信号の実測値とのずれのパーセンテージで表したグラフが図 8.10 の右のグラフである。リニアリティのグラフを見ると、およそ 40000 ADU までリニアリティ±1 % 内に収まっていることが分かる。これは、コンバージョンファクタが 3.4 e^-/ADU であることを考慮すると、1 ピクセルあたり 130000 e^- 前後まで安定した測光観測ができることを意味する。TRISPEC の InAs 検出器は、60000 e^- でリニアリティからずれ始めることを考えると、VIRGO-2K は TRISPEC に比べ 2 倍以上の S/N を稼げるため、高精度な測光観測には非常に有利であることが分かる。

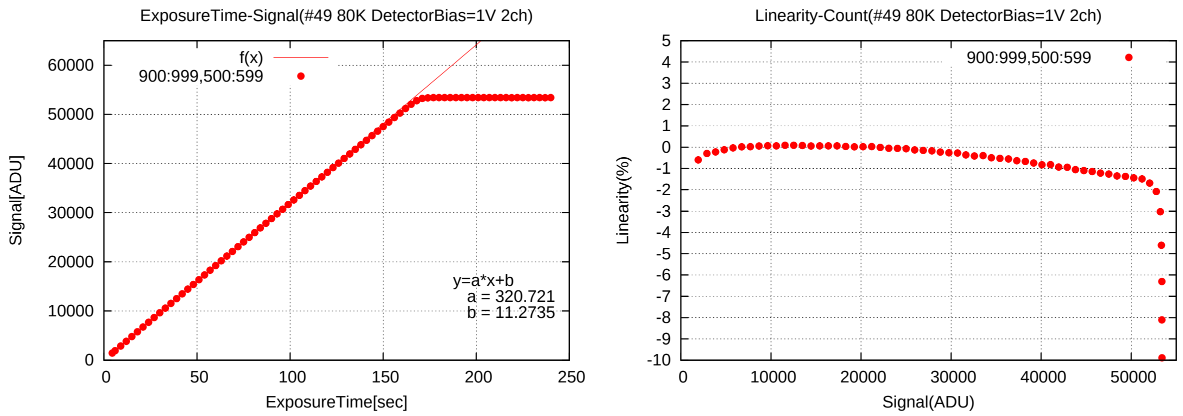


図 8.10: 左:露出時間-検出器出力カウント、右:検出器出力カウント-リニアリティ

8.2.4 Fowler Sampling による読み出しノイズの測定

VIRGO-2K は非破壊読み出し検出器であるため、検出器のスイッチ回路内で発生するノイズの影響を減らす工夫が可能である。以下、試験結果の前に Correlated DoubleSampling と Fowler Sampling について述べる。

Correlated Double Sampling(CDS)

CDS はリセット直後の画像と積分時間後の読み出し画像を差し引く方法である (図 8.11)。この方法により、リセットの際の KTC ノイズの影響を取り除くことができる。

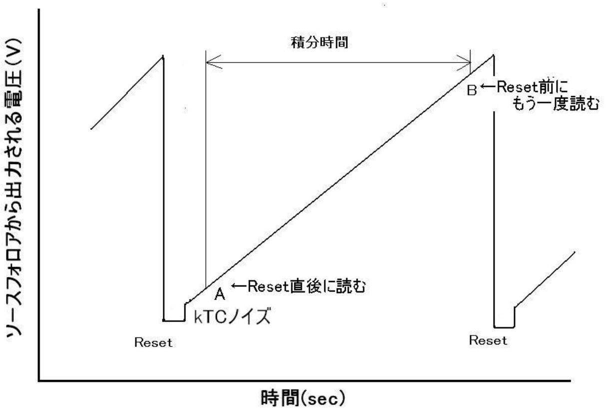


図 8.11: Correlated Doubles Sampling

Fowler Sampling

Fowler Sampling はリセット直後に複数回読み出し、積分時間後に複数数回読み出しそれぞれの平均画像で差し引く方法である (図 8.14)。この方法では、N 回の Foweler Sampling の場合 $\frac{1}{\sqrt{N}}$ に従い、ノイズが減少していく。撮像観測では CDS を用いるが、分光・偏光観測においては S/N が悪くなるため、読み出しノイズの影響を減らすために Fowler Sampling を用いる。

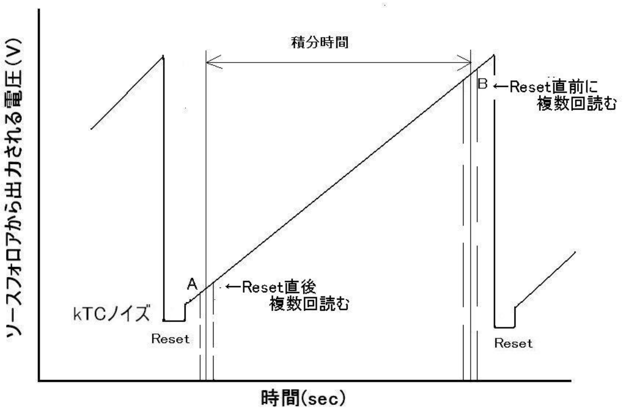


図 8.12: Fowler Sampling

ノイズ評価試験結果

Fowler Sampling による評価の際は、めくら蓋をした状態のダーク画像を 2 枚連続で取得し、その 2 枚の画像の差し引きの画像の 10000 ピクセルの標準偏差を $\sqrt{2}$ で割ったものをノイズと仮定した。図 8.13 が実際に測定に用いた画像の 1 枚で、青い四角で囲んだ領域計 10000 ピクセルを評価に用いた。Fowler Sampling は 1 回サンプリング (つまり CDS) から 14 回サンプリングまで行った。結果のグラフを図 8.14 に示す。この結果を見ると、まず Fowler 1 Sampling(CDS) による読み出しノイズはおよそ 7.1 ADU(24.1 e^-) であり、ある程度の低ノイズを達成した。しかし、Ratheon 社による mudule49 の評価結果によると 8.47 e^- という低ノイズを実現している。これは、用いている読み出しシステムや配線等にまだ改良の余地があることを意味する。また、Fowler 2 Sampling

までは $\frac{1}{\sqrt{N}}$ でノイズは減少しているが、Fowler 4 Sampling 以降大きくずれ始め、逆にノイズが高くなっていることが分かる。これは、デュワー内に光が漏れていることを意味しており、Folwer Sampling の回数をますことで、長時間露出と同じ効果が発生し、検出器に蓄積された電荷のゆらぎ成分が読み出しノイズ成分以上に出たものと思われる。この度の試験では、迷光対策を施さなかったためこのような影響が出たが、「可視赤外線カメラ」に検出器をインストールしての評価試験では迷光対策をしたうえで、より精密な読み出しノイズ評価を行う必要がある。

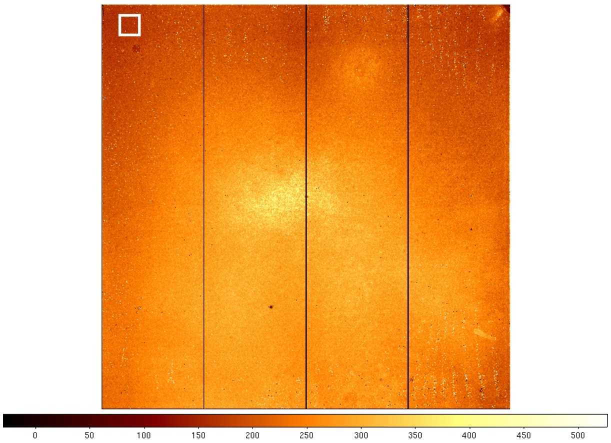


図 8.13: ダークイメージ
青い四角の領域をダークと読み出しノイズの解析に用いた。

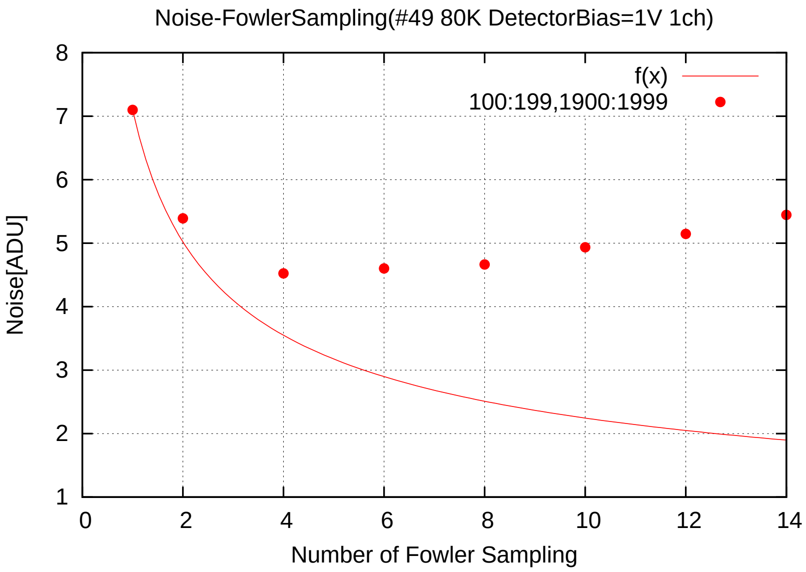


図 8.14: Fowler Sampling
迷光によるフォトンノイズの影響が大きく出ていることが分かる。

8.2.5　ダーク

ダークの評価の際は、Fowler Sampling の時と同様のセットアップで CDS による 4200 秒までのダークを取得した。評価領域は、Fowler Sampling と同様、図 8.13 の青い四角の領域 10000 ピクセルを用い、その領域の平均カウント値を評価に用いた。図 8.15 は、露出時間とダークの関係をプロットしたグラフである。このグラフを 1 次式を用いてフィッティングを行ったところ、2.19 ADU/sec(7.38 e^-/sec) であることが分かった。module49 の評価シートによると、ダークは 0.2 e^-/sec であることから、かなり大きい値になったことが分かる。これに関しても、迷光の影響が出たものと思われるため、「可視赤外線カメラ」にインストールした際に、より詳細な測定が必要となった。

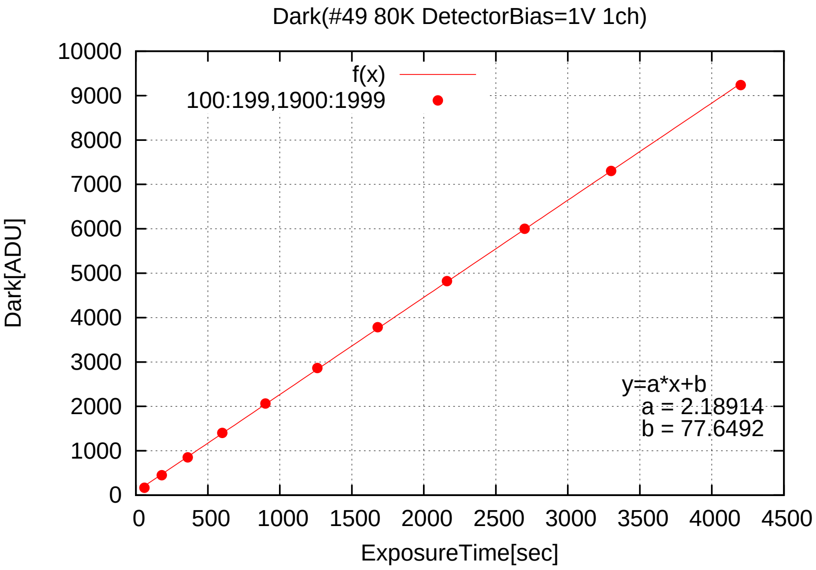


図 8.15: 露出時間とダークの関係

8.3 「かなた」望遠鏡搭載時の VIRGO-2K の性能評価

実験室においては、ある程度良い評価結果が得られた。しかし、実際に「かなた」に搭載した場合は、予期せぬノイズが加わる可能性がある。以下、「可視赤外線カメラ」を「かなた」に搭載した場合の検出器の評価試験である。

8.3.1 コンバージョンファクタと読み出しノイズ

コンバージョンファクタの測定の際は、ドーム内に設置されているフラット板 (図 8.16) にランプを当て一様な光源の画像を取得することで評価を行った。実際に取得した画像は図 8.17 である。露出時間は、10 秒から 100 秒まで 10 秒おきに取得した。今回の評価では、1 チャンネルから 4 チャンネルについて一通り行った。解析結果のグラフを図 8.18 に載せる。一次式によるフィッティングの結果、傾きはおよそ 0.07 となり、その逆数からコンバージョンファクタを求めると、14 e^-/ADU という結果となった。これは、実験室で行っていたときとは大きく異なる値である。また、読み出しノイズはおよそ 50-70 ADU という大きな値となった。上記のコンバージョンファクタを信じると、700-980 e^- という非常に大きな値となり、実験室でのコンバージョンファクタの値 3.4 e^-/ADU を用いたとしても 170-238 e^- とやはり大きな値となる。ノイズの原因の 1 つに、配線が考えられる。今回は、グラウンドやケーブルなどノイズ源の要因となりそうな部分に関して、厳密に考えずに作成を行ったことが挙げられる。いずれにせよ、ノイズ源の特定は今後の課題となる。

図 8.16: フラット板

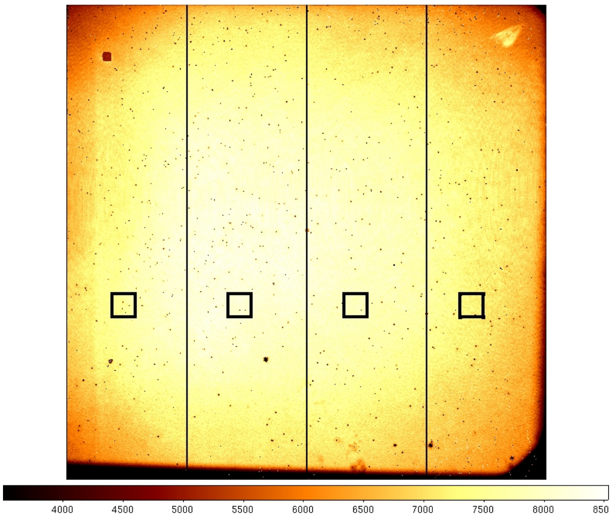


図 8.17: フラット板から得られた画像
黒く囲った領域 10000pix について解析した

8.3.2 リニアリティ

リニアリティの測定の際は、コンバージョファクタと同様フラット板からの一様な光源を用いた。露出時間と検出器出力カウントおよびリニアリティのグラフを図 8.19 に示す。図を見ると、18000 ADU 付近までリニアリティ1 %以内で保たれている。実験室の評価の際もそうであったが、VIRGO-2K はリニアリティが非常に優れた検出器であることが分かった。ただ、今回はエレキ側で飽和してしまい、18000 ADU 以上は測定できなかった。今後は、エレキの再設定の必要性がある。

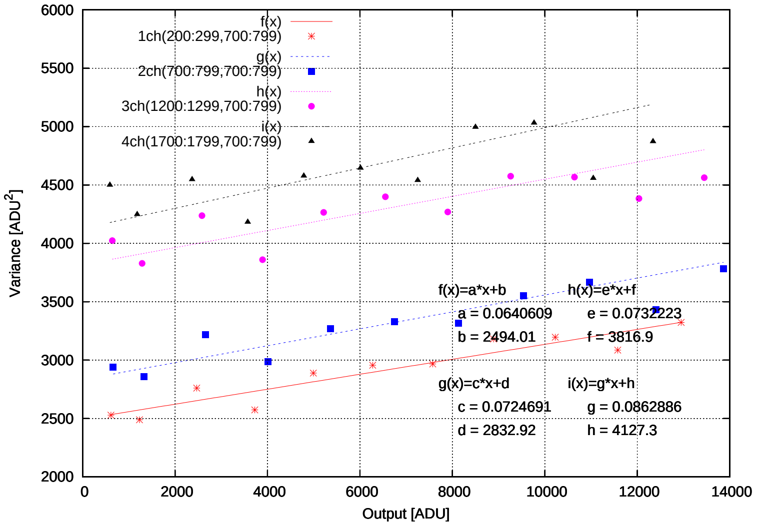


図 8.18: 出力信号と分散の関係

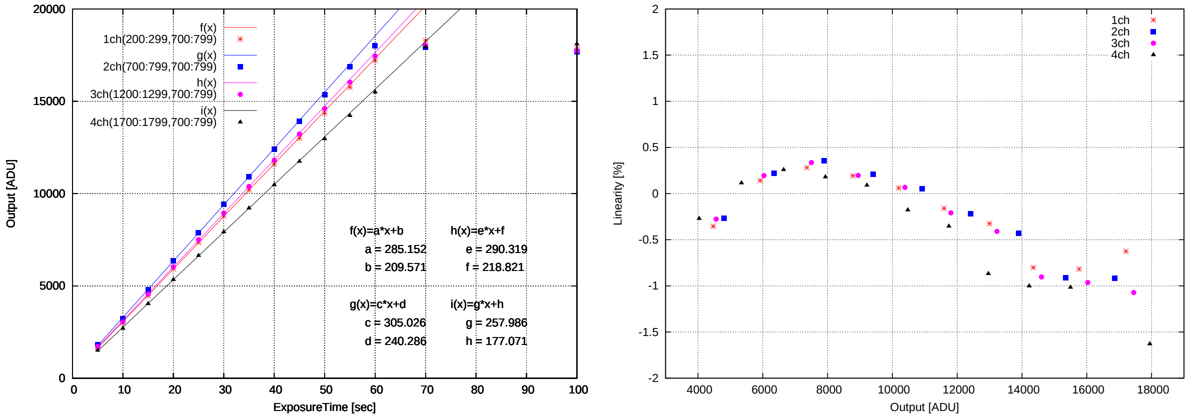


図 8.19: 左:露出時間-検出器出力カウント、右:検出器出力カウント-リニアリティ

8.3.3 Fowler Sampling による読み出しノイズの測定

Fowler Sampling によるノイズの評価の際は、赤外線フィルタをめくら蓋にし図 8.20 のようなダークの画像を取得し評価を行った。実験室での評価の際は、迷光によるフォトンリミットがかかってしまい、正確な評価ができなかった。それに対して、今回は迷光による影響がなかった。このことからも、「可視赤外線カメラ」に用いる真空槽は十分な迷光対策が施されていることが分かる。Fowler sampling の評価した結果のグラフを図 8.21 に載せる。プロット自体は $\frac{1}{\sqrt{N}}$ でノイズが減少している。しかし、今回はノイズ値は少なくとも 300 e^- 以上と非常に大きく、撮像観測にも耐えられない値となってしまった。

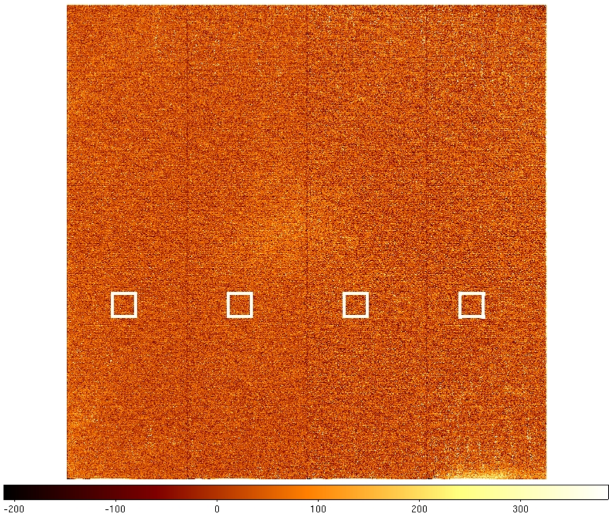


図 8.20: ダークイメージ
白く囲った領域をダークと読み出しノイズの解析に用いた。

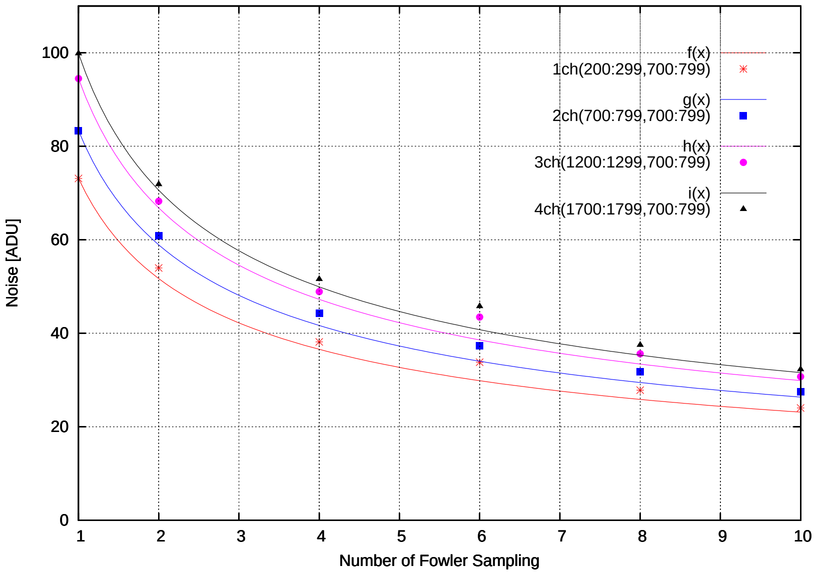


図 8.21: Fowler Sampling

8.3.4　ダーク

実験室でのダークの測定は、Fowler sampling と同様迷光による影響が出てしまい正確な評価ができなかったが、今回は十分な迷光対策が施された真空槽を用いたため、正確なダークを評価できた。評価の際は、Fowler sampling と同様の画像を用いた。露出時間とダークのカウントをプロットしたグラフを図 8.22 に載せる。一次式によるフィットの結果、およそ 0.06 ADU/sec となった。今回のコンバージョンファクタの値である 14 e^-/ADU を用いたとしても、0.84 e^-/sec となり module49 のスペック値に近い値を得ることができた。

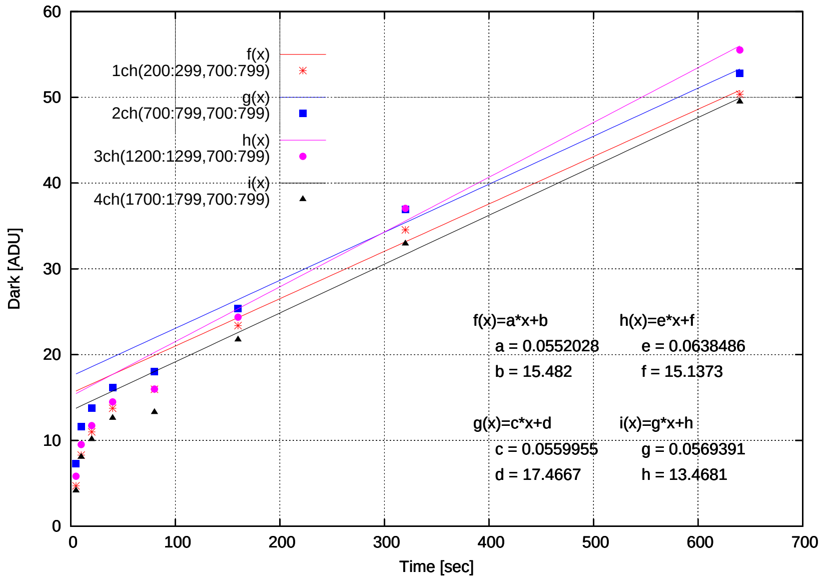


図 8.22: 露出時間とダークの関係

第9章　まとめと今後

「可視赤外線カメラ」の開発は、2006年から本格的にはじまり、そして2009年2月ついに望遠鏡に搭載してのファーストライトに成功した。しかし、問題はまだまだ山積している。

まず検出器であるが、今回「かなた」望遠鏡に搭載した状態の評価試験の結果、実験室で試験を行っていたときより、10倍以上ノイズが大きくなった。配線やグラウンドの取り方など改良の余地はまだまだあるものの、ここまでノイズが高くなったクリティカルな理由はまだ分かっていない。太陽系外惑星の観測のためにも、この項目の改善は必須であるといえる。

次に、レンズ系である。この度、ベストシーイングは1.7秒ほどだったとはいえ典型的には3秒を越えており、高感度を目指す観測装置としてはまだまだ不十分な結果となってしまった。また、収差も確認されているため冷却過程でレンズに何かしらの問題が起こったことも否定できない。検出器と並んで、レンズ系の調整は、早い内の改善が必要である。

さらに、光学素子交換機構であるホイールであるが、常温用モータを改造し用いたため、今のところ安定したモータ駆動は2つしか確認できていない。今後、撮像のみならず分光や偏光モードを導入する際に、この項目はなるべく早めに解決しておくべき課題である。

最後に、この度は赤外線1素子による読み出しとなった。というのも、宇宙科学センタが保有しているDSPカードが「可視赤外線カメラ」用には現在1枚しかないことによる。今後は、可視との同時読み出しシステムの構築も必要となる。

付 録A　近赤外線検出器の構造

A.1　赤外線の検知と暗電流

赤外線検出器は、赤外線を熱として検知する熱型検出器と光子として検知する量子型検出器の2種類に分かれる。しかし、近年の近赤外線観測では、高い感度で広い領域を1度に観測することが主流であるため、'高感度' と '多画素' を同時に満たす検出器が要求されている。これを満たすのは量子型検出器である。

量子型検出器は、赤外線の持つエネルギーにより検出素子に用いられる半導体の価電子帯の電子が伝導帯に励起される内部光電効果を利用して赤外線を検知する。不純物が全く混入していない半導体 (真性半導体) の場合、価電子帯と伝導帯の間は完全な禁止帯であるので、伝導帯への電子の励起には半導体固有のエネルギーバンドギャップ E_g(eV) 以上のエネルギーが必要である。このため、検出できる光子は式 (A.1) で表されるカットオフ波長 λ_c (μm) より短い波長となる。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \tag{A.1}$$

現在、近赤外線検出器に多く用いられている半導体はHgCdTeである。これは、HgTeとCdTeの混合物であり、その混合比を変化させることでバンドギャップが変化する半導体である。多くの場合、2.5 μm のカットオフ波長の HgCdTe が用いられる。また、5 μm まで感度を持つ半導体として InSb を用いることもある。

半導体検出器は電子の熱による励起も起こす。この電子の励起により電流が流れノイズの原因となる。この電流を暗電流と呼ぶ。暗電流量 I_d は、以下のように表される。

$$I_d \propto exp(\frac{-E_g}{k_B T}) \tag{A.2}$$

ここで、E_g はバンドギャップ、T は温度、k_B はボルツマン定数である。式 (A.2) から暗電流量は、E_g が大きいほど、また T が低いほど小さくなることが分かる。近赤外線検出素子の場合、バンドギャップエネルギーが小さいため常温では暗電流が非常に大きい。このため、検出器を冷却する必要がある。

A.2　検出法

半導体を素子として利用するにはp型とn型の半導体を接合させる必要がある。この接合により、電子および正孔の濃度がp型とn型で異なるため、n層の電子はp層へ、p層のホールはn層へ流れ込むことになる。そして、接合面付近では電子とホールが結合・消滅しキャリアが存在しない領域つまり空乏層が生じる。

この状態でp-n接合に光が照射されると価電子帯の電子は伝導帯に励起し、電子– ホール対を生成する。これらは、空乏層にかけられる逆バイアスによって電子はn側へ、ホールはp側へ流れることになる (図A.1)。その結果この電子は、電流として出力されることになる。

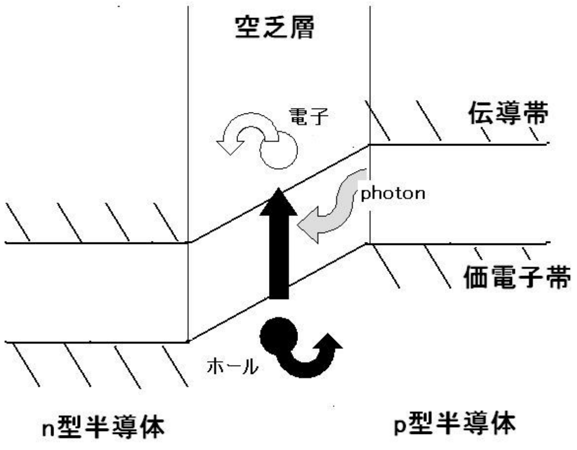


図 A.1: 逆バイアスによる空乏層での電子・ホールの移動

A.3　Source Follower per Detector

赤外線アレイと共に用いられる読み出し回路部には厳しい制限が設けられている。1 つに、回路のエレクトロルミネセンス (半導体に電流が流れることで光を放射する現象) がある。これは、間接遷移形半導体である Si を読み出し回路に用いることで自己放射を最小限抑えられる。また、エレクトロルミネセンスは電圧を極力抑えることで減少させることもできる。他の制限として、多数の極小部品が必要であることが挙げられる。これによく用いられるのが、Source Follower per Detector(SFD) である (図 A.2)。SFD は、MOSFET(metal-oxide-semiconductor field effect transistor) をベースにしておりソースフォロアを用いている。ソースフォロアは微小素子に適しており、また低いノイズを与えるという利点がある。SFD は、検出素子の出力電流をゲートのキャパシタンスに電荷として蓄積し電圧として読み出すことを目的に使われている。

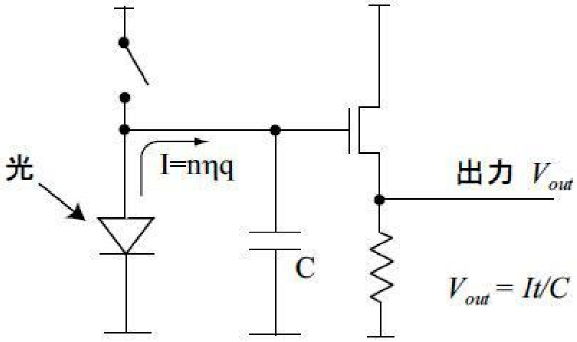


図 A.2: 読み出し回路
n は検出器に入射する光子数、η は量子効率、q は素電荷量、
C はキャパシタンス、V_{out} は出力電圧である。

A.4　マルチプレクサ (MUX)

ここ数年の近赤外線検出器の発展は目覚しく、一辺が 2048 画素の全体が 400 万画素を超える検出器が普及しつつある。これら 400 万以上の信号を同時に処理を行うのは到底困難である。そのため内部には読み出す画素を選択し、順番に信号を出力する仕組みが実装されている。

400 万以上の信号は出力ライン上で連続的に現れるが、それらは内部のエレクトロニクスによってシリアルに処理される。これをマルチプレクスといい、このような機能を持つ読み出し回路全体を指してマルチプレクサ (MUX) と呼ぶ。MUX の例を図 A.3 に示す。T_1 が SFD の MOSFET にあたる。また、T_2、T_3、T_4 および T_5 がスイッチである。これらのスイッチはシフトレジスタで制御され、結果的に画素が選択されることになる。そもそも SFD は、スイッチのような機能を用いて出力時以外は常に off の状態で電荷を蓄える仕組みになっている。このため、アレイに必要な電力を必要最小限に抑えることができる。低電力消費は、冷却装置のデザインを考えるときに重要となり、また適切な温度でのオペレーティングを維持する助けにもなる。それに加えて、エレクトロルミネセンスを最小限に抑えることも可能である。

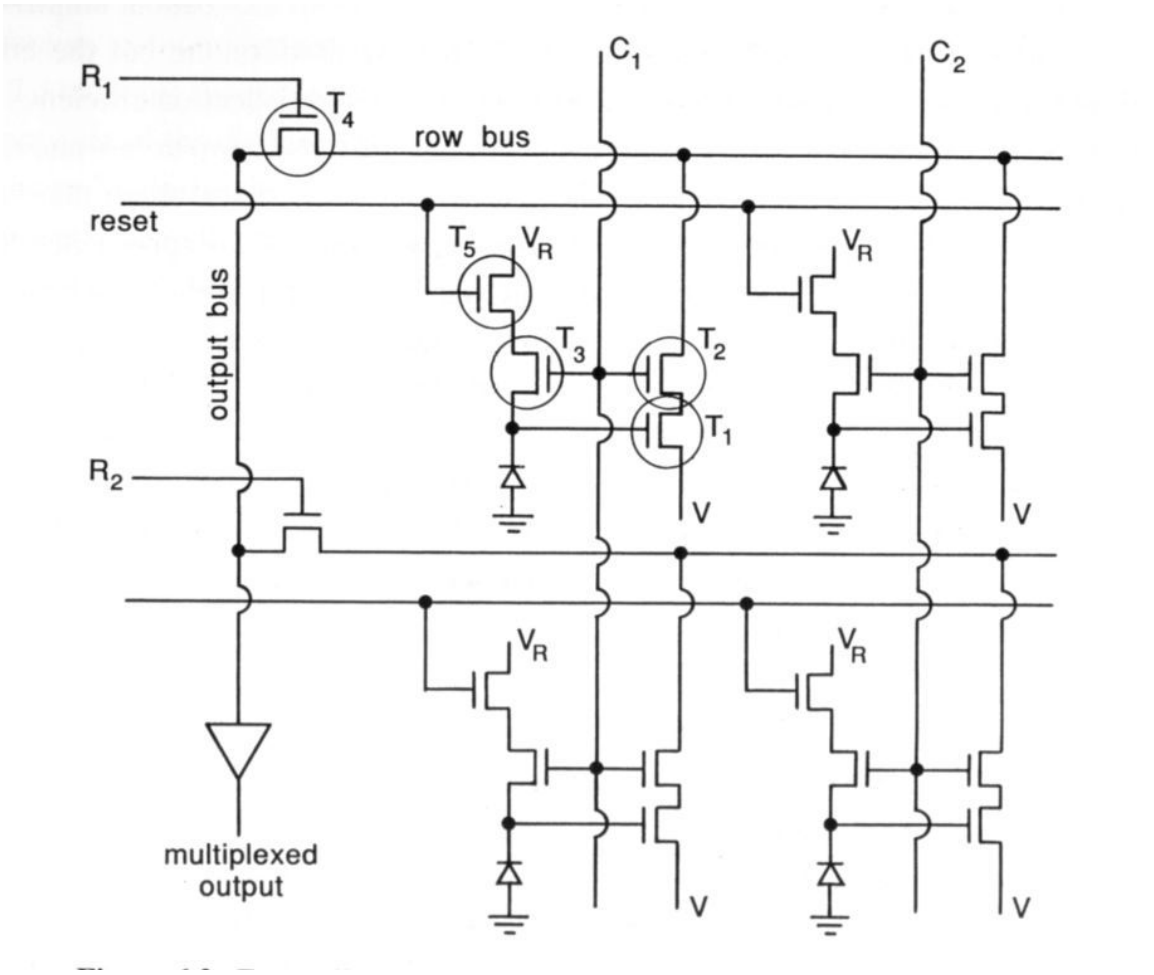


図 A.3: MUX の構造例
4 ピクセル分の読み出し回路を表した図。

以上の過程を経て、検出素子に入射された近赤外線を電気信号として選択的に読み、シリアルに出力されることになる。以下、具体的な検出器の構造を示す。

A.5 近赤外線検出器の構造

近赤外線検出器は、検出素子層と MUX 層の 2 層構造となっている。MUX は前項に述べたように読み出し集積回路であり、各ピクセルをシフトレジスタを用いて選択できるようにしたもので Si でできている。一方、検出素子層は HgCdTe 半導体を用いている。このため便宜上 2 層となっている。このような検出器を「ハイブリット検出器」と呼ぶ。各素子に蓄えられた電荷はリセットされるまで保存され、何度でも読み出しを行うことができる。

検出素子層は、近赤外線が透過するサファイアなどの基板上で p–n 接合を作る。MUX 層は一般の半導体回路のプロセスで製造される。この検出素子層と MUX 層をインジウムを媒介としてピクセルごとに接合する。しかし、この接続は非常に難しく毎回同じ様にできるわけではない。そのため、一部欠陥を含むものもある。この欠陥を多く含むものをエンジニアリンググレードと呼び、欠陥を 0.2 %以下含むものををサイエンスグレードと呼ぶ。また、検出素子の載っていない読み出し回路のみのもの、つまり MUX のみのものもある。MUX は近赤外線に対する感度はないが、Si により可視光にわずかな感度があるためこの感度を使って検出器を駆動させるシステムのテストを行うことができる。以下、近赤外線検出器の概略図を示す。

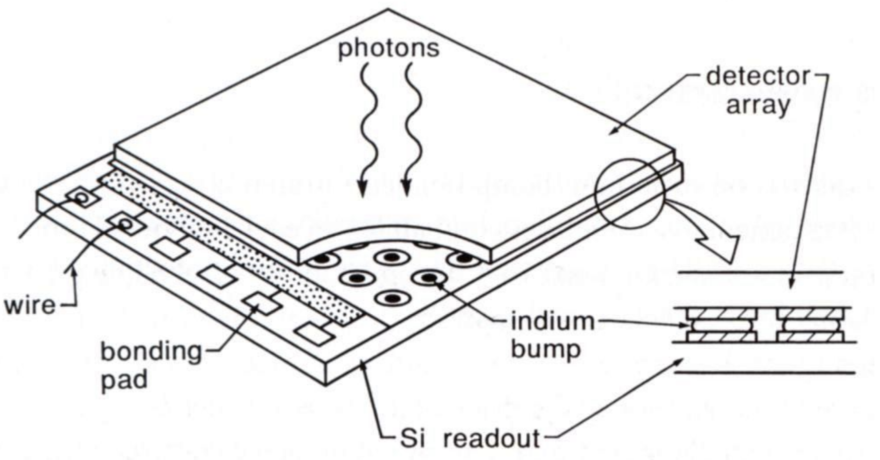


図 A.4: 近赤外線検出器の概略図

A.6　VIRGO-2K の集積回路

VIRGO-2K の読み出し素子は図 A.5 に示すように、3 つのトランジスタから構成される。その中心となるトランジスタ Mdriver は、PMOSFET ソースフォロアを形作っている。また、他の 2 つのトランジスタはスイッチの役目を果たす。トランジスタ M2 は、外部からの電圧 vrstUc と vdetCom による逆バイアスで検出素子部のリセットを行うかどうかのスイッチである。これは、内部で発生する prstUc クロックで制御される。トランジスタ M1 は、ソースフォロアのソース側のスイッチである。このスイッチのため、row シフトレジスタでアドレスされるまでは常に off の状態にある。トランジスタ M1 は prowEn クロックで制御される。

検出部で生成されたキャリアは、ソースフォロアのゲートで 0 V から順方向への電圧を引き起こす。積分時間完了とともに、row シフトレジスタにより選択されたある行全ての M1 のスイッチが入り、その行すべてに Iidle 電流が供給され、ソースフォロアが働くことになる。また、マルチプレクス前のピクセル周期で Islew 電流が発生し、ソースフォロアのソースでゲートで達する電圧より高い電圧レベルを与えることになる。この SFD で得られるゲイン A_{sf1} は

$$A_{sf1} = \frac{1}{1 + \frac{g_{ds}}{g_m}} \tag{A.3}$$

で与えられる。ここで g_m は MOSFET の相互コンダクタンスで、g_{ds} はドレインソース相互コンダクタンスである。ソースドレイン抵抗は、$r_{ds} = \frac{1}{g_{ds}}$ で与えられ、$\frac{g_m}{g_{ds}} \gg 1$ であるからゲインはおよそ 1 である。

図 A.6 は読み出し出力部を詳細に示したものである。Vslew と Vidle はカレントミラー回路から内部で発生させられる。これらにより電流源 Iidle と Islew が発生することになる。

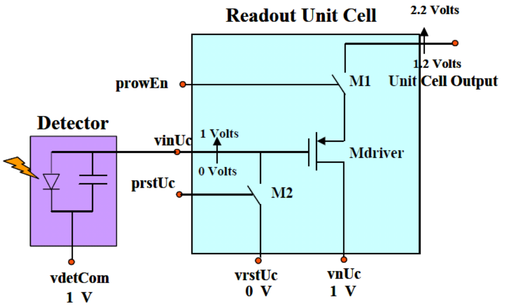


図 A.5: 検出部と読み出し素子の構成

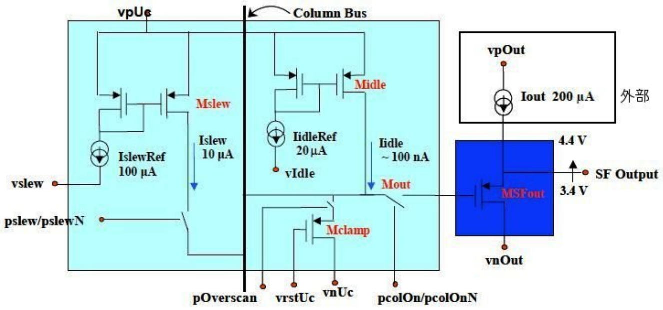


図 A.6: 読み出し出力部の構造

付 録B　VIRGO-2K用クロックパターン

B.1　cpg.ascii

cpg.ascii はクロックパターンの最小単位を記述するためのファイルである。ファイル内の番号 0、1、2、3、4、5 は VIRGO-2K 用クロックパターンで、他が ADC 用クロックパターンである。

B.1.1　リセット用クロック

```
#################################################################

set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 11  # no-read reset (FrameStart)

#       S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#       t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#       a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#       r     u  e  e  R     N  -  +  O  V  E
#       t     c  t  t  e                    P
#             e  M     s
#             O  o     e
#             u  d     t
#             t  e
#
start   0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  50   ]  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2   ]  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   1   ]  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t  50   ]   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2   ]   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   1   ]   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]

end

#################################################################

set_clock_tick  1  # numebr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 13  # no-read reset

#      S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#      a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#      r     u  e  e  R     N  -  +  O  V  E
#      t     c  t  t  e                    P
#            e  M     s
#            O  o     e
#            u  d     t
#            t  e
#
start  0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  50  |  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2  |  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   1  |  |   ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t  50  |   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2  |   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]
t   1  |   ]  ] |   ] |   ] |  |   ] |  |   ]

end
###################################################################
```

B.1.2 読み出し用クロック

```
###################################################################

set_clock_tick  1  # numer br of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 21  # no-reset read (FrameStart)

#      S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#      a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#      r     u  e  e  R     N  -  +  0  V  E
#      t     c  t  t  e                    P
#            e  M     s
#            O  o     e
#            u  d     t
#            t  e
#
start  0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  50   ] |   ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2   ] |   ] |  |  |   ] |  |   ] |   ]  ]
t   1   ] |   ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t  50   ]  ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2   ]  ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |   ]  ]
t   1   ]  ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]

end

##################################################################

set_clock_tick  1  # numerbr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 23  # no-reset read

#      S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#      a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#      r     u  e  e  R     N  -  +  0  V  E
#      t     c  t  t  e                    P
#            e  M     s
#            O  o     e
#            u  d     t
#            t  e
#
start  0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  50  |  |   ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2  |  |   ] |  |  |   ] |  |   ] |   ]  ]
t   1  |  |   ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t  50  |   ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
t   2  |   ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |   ]  ]
t   1  |   ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]

end

##################################################################
```

B.1.3 残像対策用クロック

読み出さない間は、常にリセットをかけることができる。

```
###################################################################

set_clock_tick  1  # numerbr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 31  # reset always no-read

#      S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#      a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#      r     u  e  e  R     N  -  +  0  V  E
#      t     c  t  t  e                    P
#            e  M     s
#            O  o     e
#            u  d     t
#            t  e
#
start  0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  1   |   ]  ] |  |   ]  ] |  |   ] |  |   ]
end

###################################################################

set_clock_tick  1  # numerbr of 80nsec clock ticks in one time bin
operation_type 33  # no-reset no-read

#      S  p  r  R  R  v  D  T  C  C  C  C  S
#      t  m  e  e  e  l  C  R  D  D  D  O  L
#      a  c  d  s  s  o  R  A  S  S  S  N  E
#      r     u  e  e  R     N  -  +  0  V  E
#      t     c  t  t  e                    P
#            e  M     s
#            O  o     e
#            u  d     t
#            t  e
#
start  0  1  2  3  4  5  22 18 20 21 19 17 29
t  1   |   ]  ] |  |  |   ] |  |   ] |  |   ]
end


###################################################################
```

B.2 spv.ascii

spv.ascii は cpg.ascii で作成したクロックパターンの最小単位を組み合わせて実際に出力するクロックを記述するためのファイルである。cpg.ascii で作成した 2 ピクセル分のクロックをループさせることで 2k×2k 分のクロックが出力できる。reset_always と no_reset は、残像対策のためのパターンである。

```
# ------------------------------------------------------------ #
#                  VIRGO operation                             #
# ------------------------------------------------------------ #

begin virgo_reset

       ccd_operation 0 11   1
       ccd_operation 0 13  258
       loop1_start 2049
            ccd_operation 0 13 259
       loop1_continue
end

begin virgo_read
      ccd_operation 0 21   1
      ccd_operation 0 23 258
      loop2_start 2049
           ccd_operation 0 23 259
      loop2_continue
end

begin virgo_redundant
      ccd_operation 0 23 8192
end


begin virgo_read_redundant
      ccd_operation 0 21   1
      ccd_operation 0 23 258
      loop2_start 2049
           ccd_operation 0 23 259
      loop2_continue
      ccd_operation 0 23 8192
end



begin reset_always
      loop6_start 2050
ccd_operation 0 31 259
      loop6_continue
end

begin no_reset
    ccd_operation 0 33 1

end
```

付 録C　シャッタードライバ用AVRプログラム

AVRに書き込んだプログラムを以下に示す。Linux側のプログラムは省略する。

C.1　ソースプログラム

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <ctype.h>
#include <string.h>

#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define nop() __asm__ __volatile__ ("nop")

/** 動作設定**/
#define FOSC 8000000 // 8MHz

/** 設定 UART **/
#define BAUD 57600 // 57600bps
#define MYUBRR FOSC/16/BAUD-1 // 分周率 UART
#define UCSRA_U2X 1 // 倍速フラグ等速ならコメントアウト
//#ifdef UCSRA_U2X // 倍速が定義されているならば
 //#define MYUBRR FOSC/16/(BAUD/2)-1 // 分周率 UART倍速 ()
//#endif

/* 設定 PORT */
void port_init(void){
	DDRB=0x01;
	DDRC=0x01;
	PORTB=1;
	PORTC=0;
}

/* 設定 USART */
void usart_init(unsigned int ubrr){
  UBRRH = (unsigned char)(ubrr>>8); // ボーレート上位 8bit
  UBRRL = (unsigned char)ubrr; // ボーレート下位 8bit
  UCSRB = (1<<RXEN)|(1<<TXEN)|(1<<RXCIE)|(1<<TXCIE); // 送受信許可、受信完了割り込み許可
  UCSRC = (1<<URSEL)|(3<<UCSZ0)|(0<<USBS)|(0<<UPM0); // フレーム設定非同期通信ビット8 ストップビット 1 パリティ無し
}

/*1文字送信関数*/
void USART_Tx( char tx_data )
{
	while( !( UCSRA & (1<<UDRE)) )
		;
	UDR = tx_data;
}

/*1文字受信関数*/
unsigned char USART_Rx( void )
{
	while ( !(UCSRA & (1<<RXC)) )
		;
	return UDR;
}

/*文字列送信関数*/
void STRING_OUT(char *string)
{
	while (*string != '\0'){
		USART_Tx(*string);
		string ++;
	}
}

/*受信データ破棄関数*/
void USART_Flush(void)
{
	unsigned char dummy;
	while ( UCSRA & (1<<RXC) ) dummy = UDR;
}

/*関数 wait*/
/*8MHz 分周   1/64(1/8MHz)分周カウント*64*125=1単位 ms*/
/*実験値：カウント     115+関数個 nop51*/
void wait_ms(unsigned long num)
{
	unsigned long i;

	TCCR0 = (0<<CS02)|(1<<CS01)|(1<<CS00); //分周 64
	TCNT0 = 0;
	STRING_OUT("Shutter␣OPEN###\n"); //コマンド処理を続行するため、あえてこの一文を送る（側は改行を受け取ると通信が終了するため）Linux
	for(i = 0; i<num; i++){
```

```
		while(TCNT0<115);
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop(); nop(); nop(); nop();
			nop(); nop(); nop();

		TCNT0 =0;

		if(bit_is_set(UCSRA,RXC)){

			if(USART_Rx()=='c'){

			USART_Flush();

			STRING_OUT("Cancel!!!###");
			USART_Tx('\n');
			USART_Flush();
			nop();
			//nop(); 古い/*のときはコメントアウトをはずす ATmega8*/
			STRING_OUT("Cancel!!!###");
			USART_Tx('\n');
			USART_Flush();

			//GICR = _BV(INT0);
			sei();
			//GICR &= ~_BV(INT0);

			USART_Flush();
			}
		}
    }
	TCCR0 = 0;
}

/*キャンセル専用割り込み関数*/
/*
ISR (SIG_INTERRUPT0)
{

	STRING_OUT("Cancel!!!###");
	USART_Tx('\n');

	USART_Flush();

	return ;
}
*/

/*メインルーチン*/
int main(void)
{
	int i = 0;
	char x[6]="\0\0\0\0\0\0";
	char time0[6]="\0\0\0\0\0\0";
    long int time1;

	port_init();
	usart_init(MYUBRR);
	GICR &= ~_BV(INT0);

for(;;)
{
	USART_Flush();

		for(i=0; i<6; i++){
			x[i] = USART_Rx();
			if(x[i]=='\0'){
				break;
			}else{
				continue;
			}
		}

			time0[0]=x[0];
			time0[1]=x[1];
			time0[2]=x[2];
			time0[3]=x[3];
			time0[4]=x[4];
			time0[5]=x[5];
			time0[6]='\0';

		USART_Flush();

		if(time0[0]=='t' && time0[5]=='s'){
			if(time0[1]=='0'){
				STRING_OUT("ERROR###\n");
			}else{

				time0[0]=time0[1];
				time0[1]=time0[2];
				time0[2]=time0[3];
				time0[3]=time0[4];
				time0[4]='0';
				time0[5]='0';
				time0[6]='\0';

			time1=atol(time0);

				PORTB=0;
				PORTC=1;

				wait_ms(time1);

				PORTB=1;
				PORTC=0;

				USART_Tx(time0[0]);
				USART_Tx(time0[1]);
				USART_Tx(time0[2]);
				USART_Tx('.');
```

```
                USART_Tx(time0[3]);
                STRING_OUT("sec␣Exporsure␣END!!!###\n");
            }
        }
        else if(time0[0]=='t' && time0[4]=='s'){
            if(time0[1]=='0'){
                STRING_OUT("ERROR###\n");
            }else{

                time0[0]=time0[1];
                time0[1]=time0[2];
                time0[2]=time0[3];
                time0[3]='0';
                time0[4]='0';
                time0[5]='\0';

            time1=atol(time0);

                PORTB=0;
                PORTC=1;

                wait_ms(time1);

                PORTB=1;
                PORTC=0;

                USART_Tx(time0[0]);
                USART_Tx(time0[1]);
                USART_Tx('.');
                USART_Tx(time0[2]);
                STRING_OUT("sec␣Exporsure␣END!!!###\n");
            }
        }
        else if(time0[0]=='t' && time0[3]=='s'){
            if(time0[1]=='0'){
                STRING_OUT("ERROR###\n");
            }else{

                time0[0]=time0[1];
                time0[1]=time0[2];
                time0[2]='0';
                time0[3]='0';
                time0[4]='\0';

            time1=atol(time0);

                PORTB=0;
                PORTC=1;

                wait_ms(time1);

                PORTB=1;
                PORTC=0;

                USART_Tx(time0[0]);
                USART_Tx('.');
                USART_Tx(time0[1]);
                STRING_OUT("sec␣Exporsure␣END!!!###\n");

            }

        }
        else if(time0[0]=='t' && time0[2]=='s'){
            if(time0[1]=='0'){
                STRING_OUT("0.0␣sec␣Exporsure␣END!!!###\n");
            }else{

                time0[0]=time0[1];
                time0[1]='0';
                time0[2]='0';
                time0[3]='\0';

            time1=atol(time0);

                PORTB=0;
                PORTC=1;

                wait_ms(time1);

                PORTB=1;
                PORTC=0;

                USART_Tx('0');
                USART_Tx('.');
                USART_Tx(time0[0]);
                STRING_OUT("sec␣Exporsure␣END!!!###\n");

            }
        }
        else if(time0[0]=='f' && time0[1]=='l' && time0[2]=='u' && time0[3]=='s' && time0[4]=='h')
        {
            USART_Flush();
            x[0]='\0'; time0[0]='\0';
            x[1]='\0'; time0[1]='\0';
            x[2]='\0'; time0[2]='\0';
            x[3]='\0'; time0[3]='\0';
            x[4]='\0'; time0[4]='\0';
            x[5]='\0'; time0[5]='\0';
            x[6]='\0'; time0[6]='\0';

            STRING_OUT("Flush!###\n");
            USART_Flush();
        }
        else{
            USART_Flush();
            STRING_OUT("ERROR!###\n");
            USART_Flush();
        }

    USART_Flush();

}

}
```

付 録D　各種レンズの偏心測定

表 D.1: レンズ偏心測定値 (コリメータレンズ)

レンズ番号	(目的レンズ表面からの) 調整レンズ位置 [mm]	曲率半径 [mm](293 K)	指定公差シフト値 [mm]	測定シフト値 [mm]
G2 表	99.8 (f=250)	150.2	±0.05	0.065
G2 裏	487.8 (f=250)	-1173.0	±0.05	—
G3 表	158.9 (f=250)	62.2	±0.05	0.03
G3 裏	341.4 (f=250)	infinity	±0.05	—
G4 表	331.1 (f=250)	-81.1	±0.05	0.04
G4 裏	171.6 (f=250)	192.0	±0.05	0.025
G5 表	174.3 (f=250)	162.9	±0.03	0.025
G5 裏	214.8 (f=250)	42.3	±0.03	0.007
G6 表	296.2 (f=250)	94.7	±0.03	—
G6 裏	—	infinity	±0.03	—
G7 表	113.5 (f=250)	-106.4	±0.03	0.02
G7 裏	268.9 (f=250)	43.0	±0.03	0.04
G8 表	270.0 (f=250)	45.5	±0.03	0.02
G8 裏	184.5 (f=250)	-65.5	±0.03	0.005

表 D.2: レンズ偏心測定値 (赤外線カメラレンズ)

レンズ番号	(目的レンズ表面からの) 調整レンズ位置 [mm]	曲率半径 [mm](293 K)	指定公差シフト値 [mm]	測定シフト値 [mm]
G11 表	194.1 (f=250)	55.9	±0.03	0.013
G11 裏	307.9 (f=250)	-176.0	±0.03	0.019
G12 表	310.1 (f=250)	65.2	±0.03	0.033
G12 裏	327.2 (f=250)	304.0	±0.03	—
G13 表	276.3 (f=250)	-95.6	±0.03	0.014
G13 裏	129.4 (f=500)	59.7	±0.03	0.05
G14 表	157.3 (f=250)	-34.8	±0.03	0.016
G14 裏	454.0 (f=250)	-158.0	±0.03	—
G15 表	311.1 (f=250)	198.0	±0.05	0.028
G15 裏	171.4 (f=250)	-78.60	±0.05	0.034

表 D.3: レンズ偏心測定値 (可視カメラレンズ)

レンズ番号	(目的レンズ位置からの) 調整レンズ位置 [mm]	曲率半径 [mm](293 K)	指定公差シフト値 [mm]	測定シフト値 [mm]
G16 表	205.6 (f=250)	44.4	±0.03	0.025
G16 裏	304.9 (f=250)	-194.6	±0.03	0.045
G17 表	289.1 (f=250)	53.0	±0.03	—
G17 裏	294.4 (f=250)	infinity	±0.03	—
G18 表	272.8 (f=250)	-97.5	±0.03	0.02
G18 裏	8.7 (f=500)	51.7	±0.03	0.04
G19 表	396.6 (f=500)	-26.4	±0.03	0.008
G19 裏	374.0 (f=500)	-40.0	±0.03	—
G20 表	283.9 (f=250)	73.0	±0.05	—
G20 裏	424 (f=250)	174.0	±0.05	—

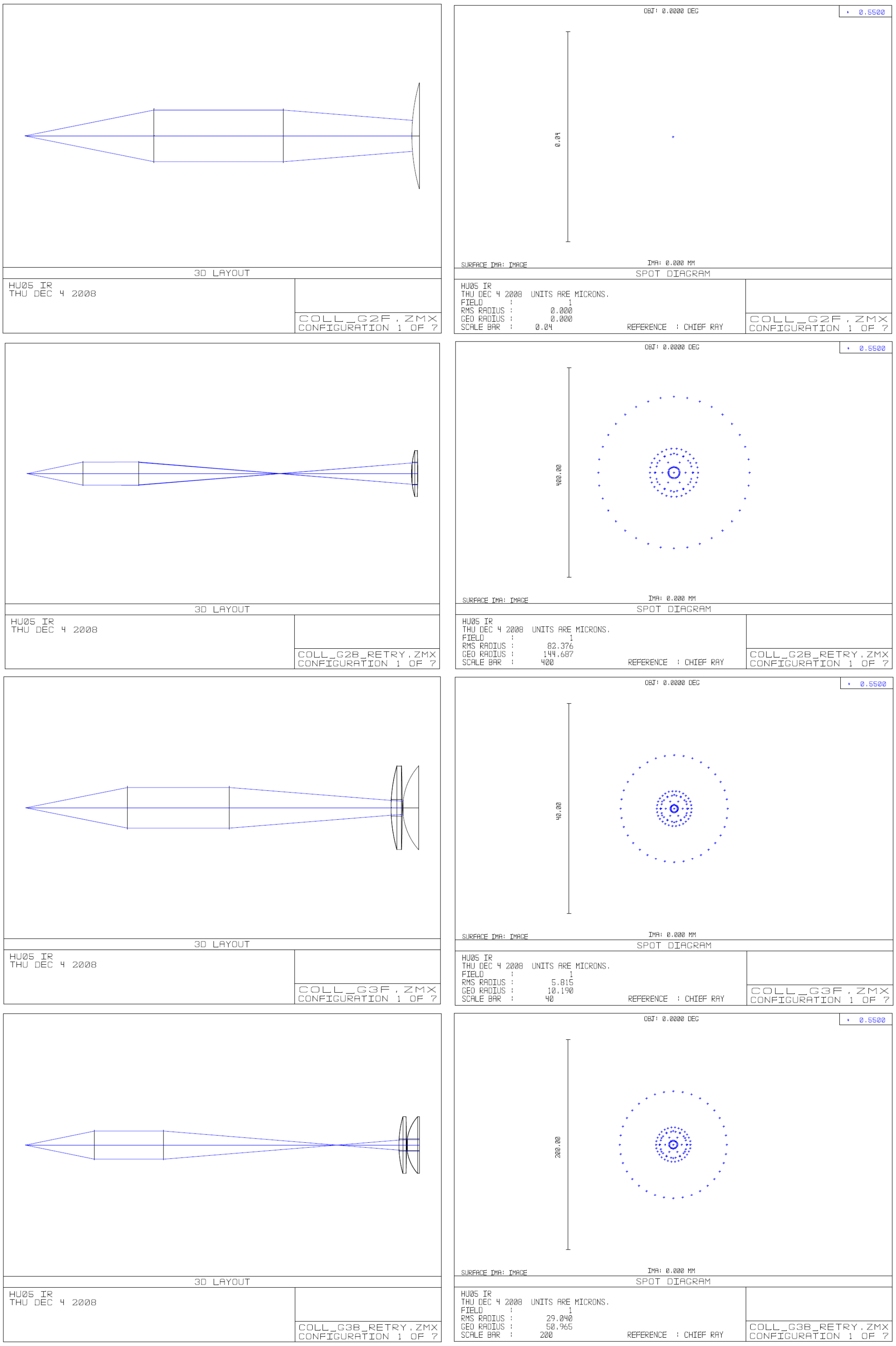


図 D.1: コリメータレンズ群 (G2,G3)

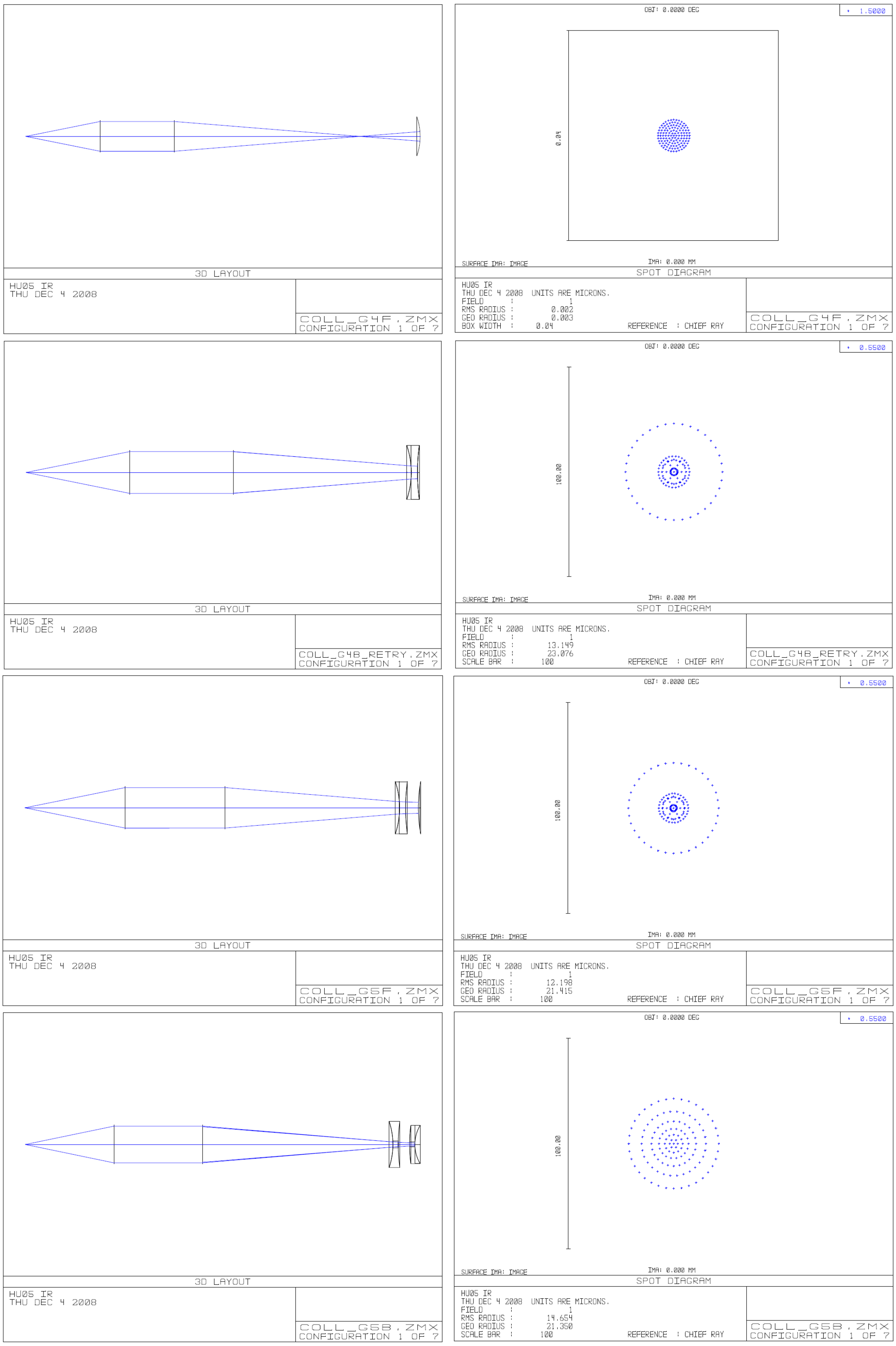


図 D.2: コリメータレンズ群 (G4,G5)

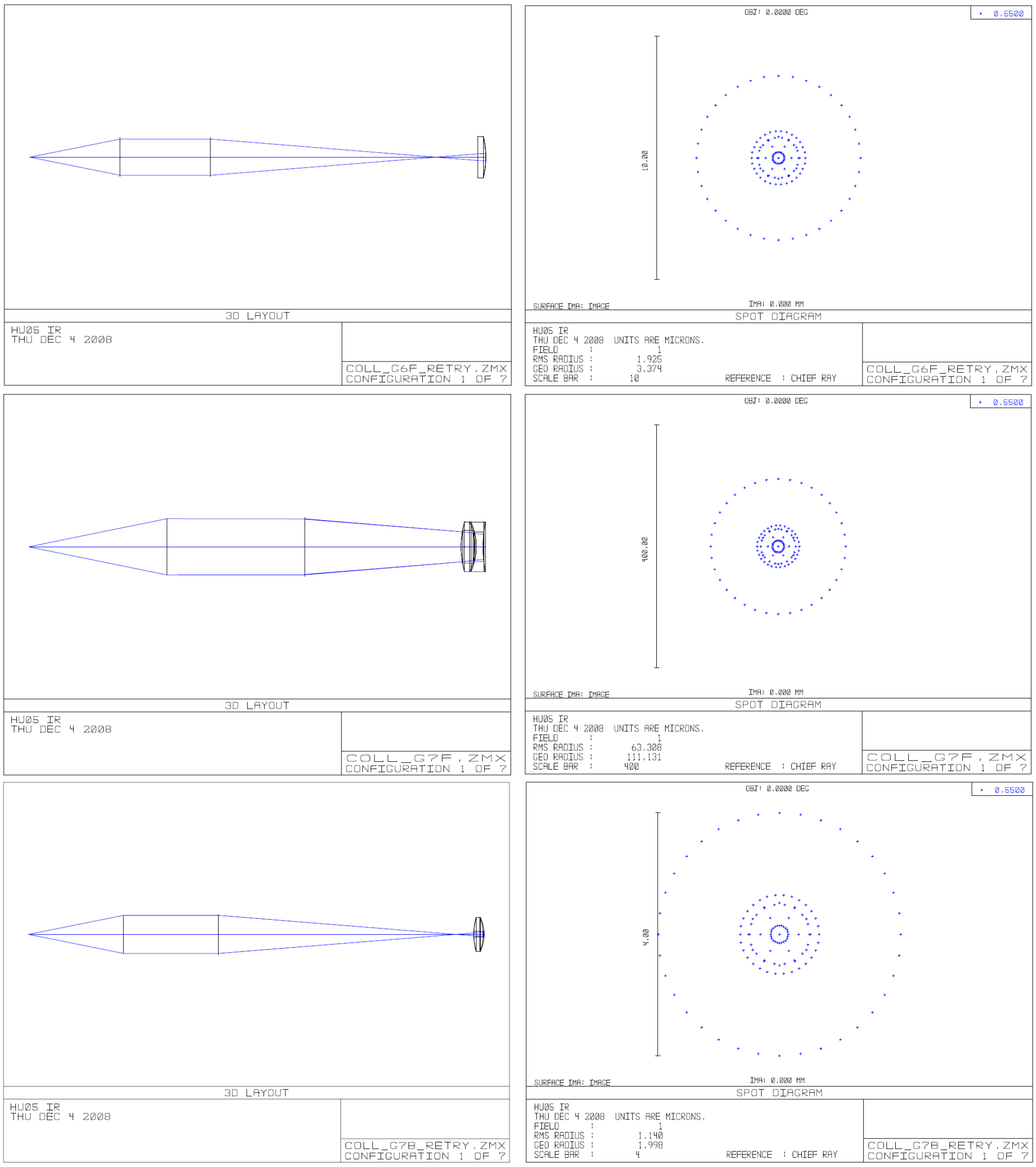


図 D.3: コリメータレンズ群 (G6,G7)

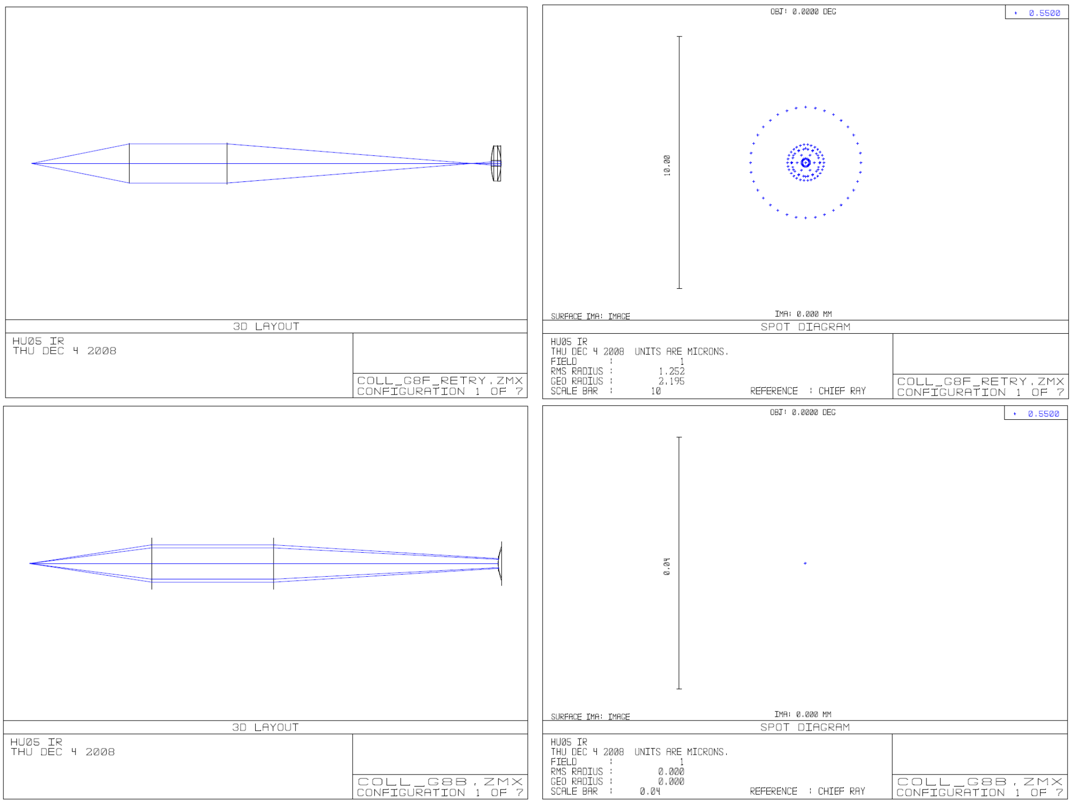


図 D.4: コリメータレンズ群 (G8)

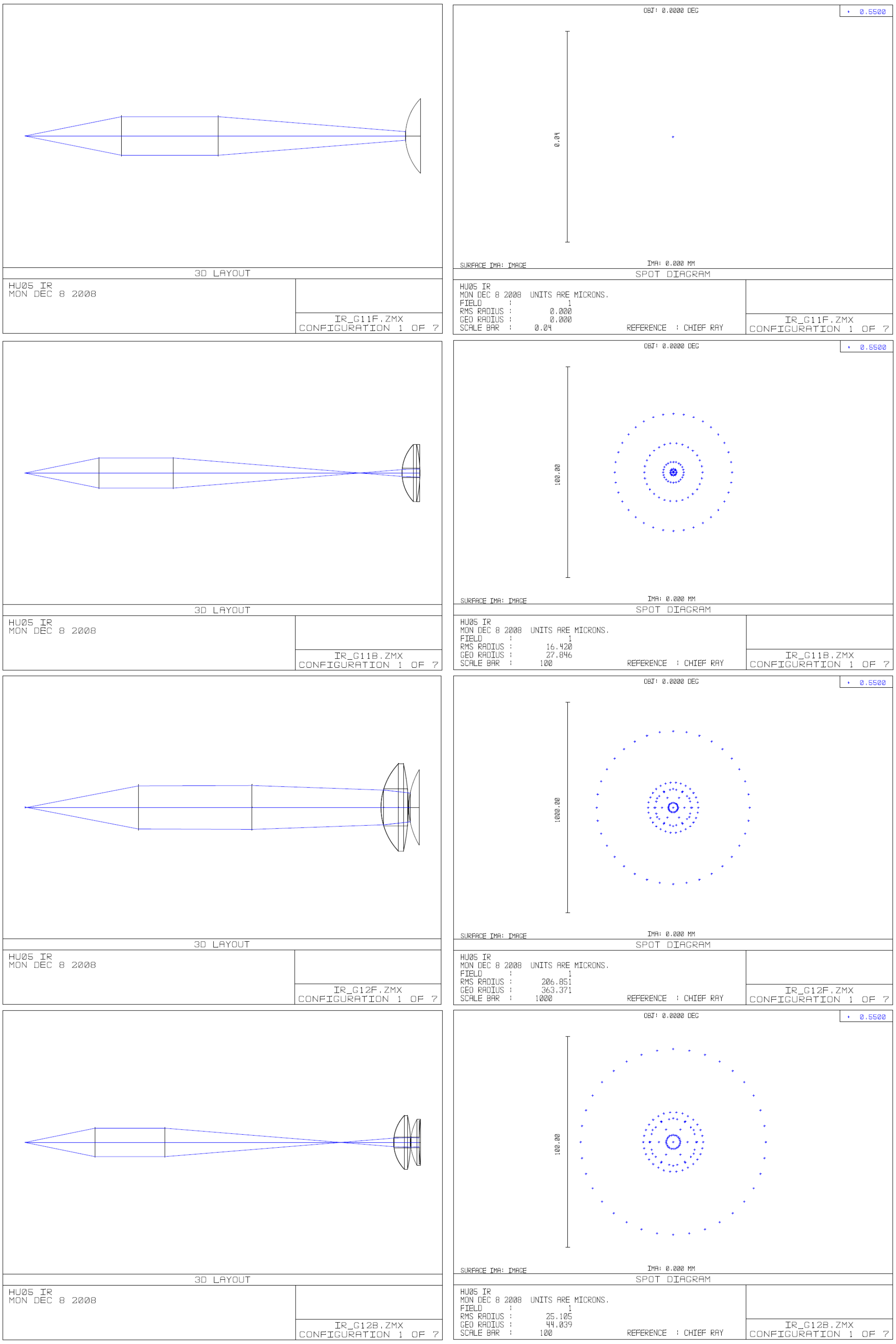


図 D.5: 赤外線カメラレンズ群 (G11,G12)

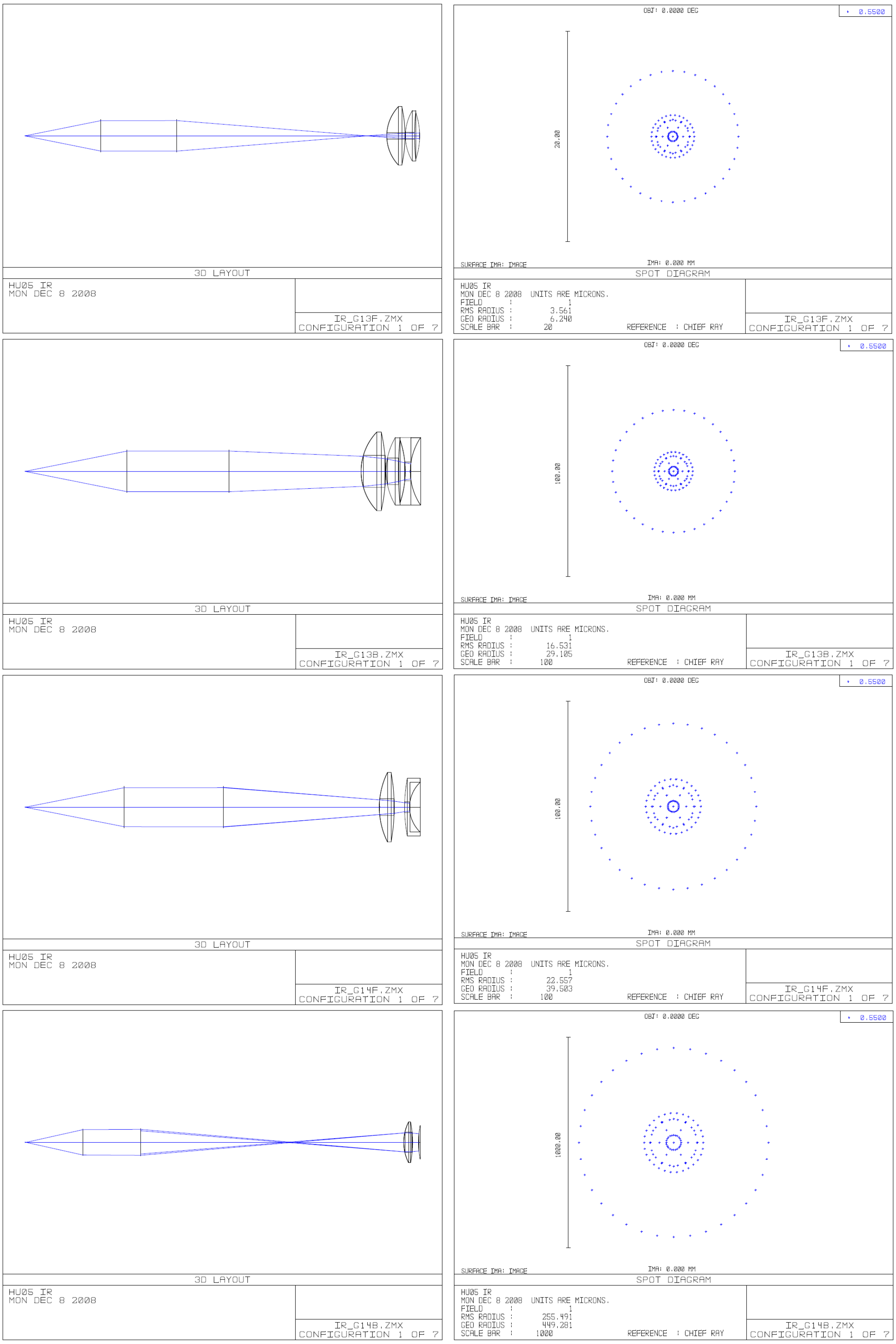


図 D.6: 赤外線カメラレンズ群 (G13,G14)

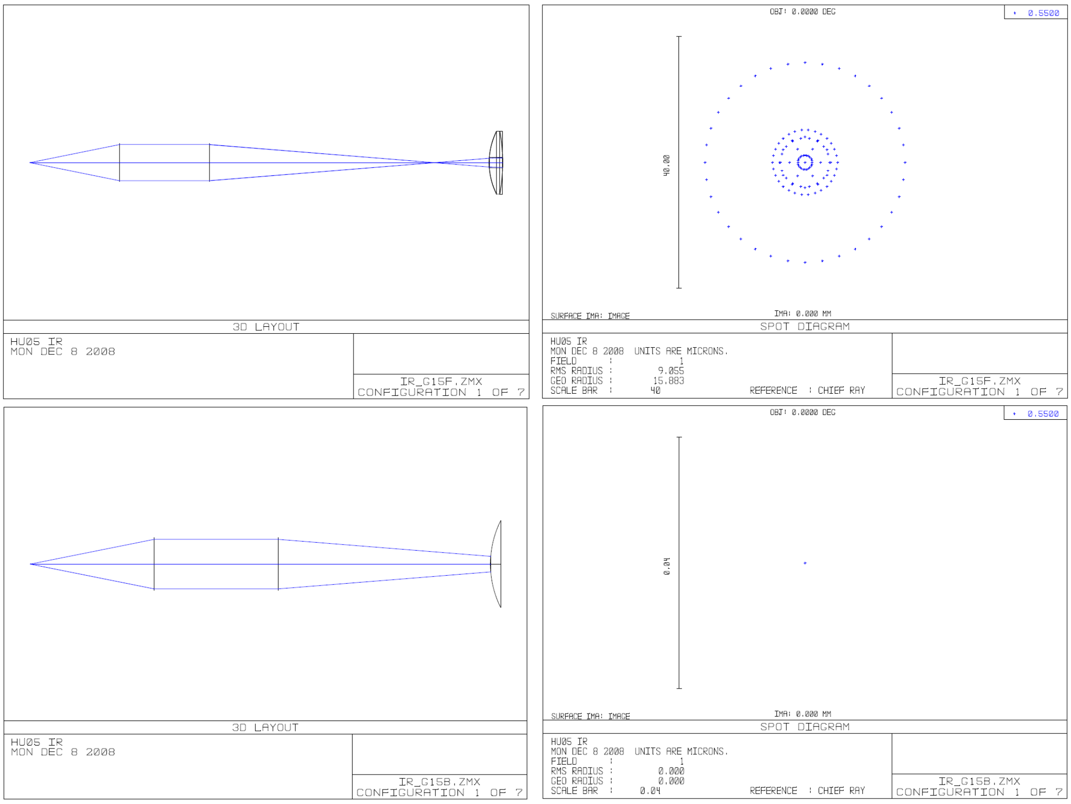


図 D.7: 赤外線カメラレンズ群 (G15)

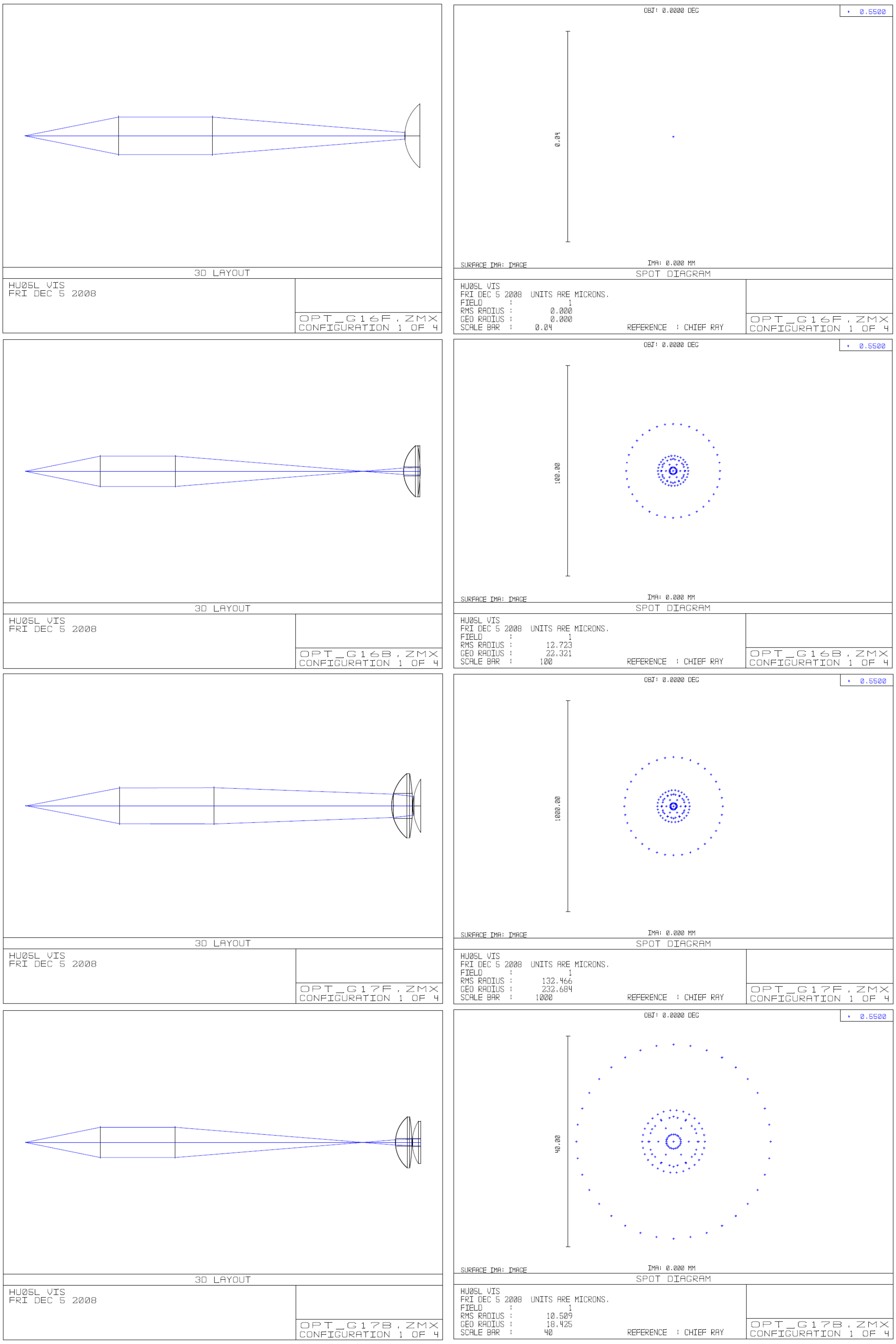


図 D.8: 可視カメラレンズ群 (G16,G17)

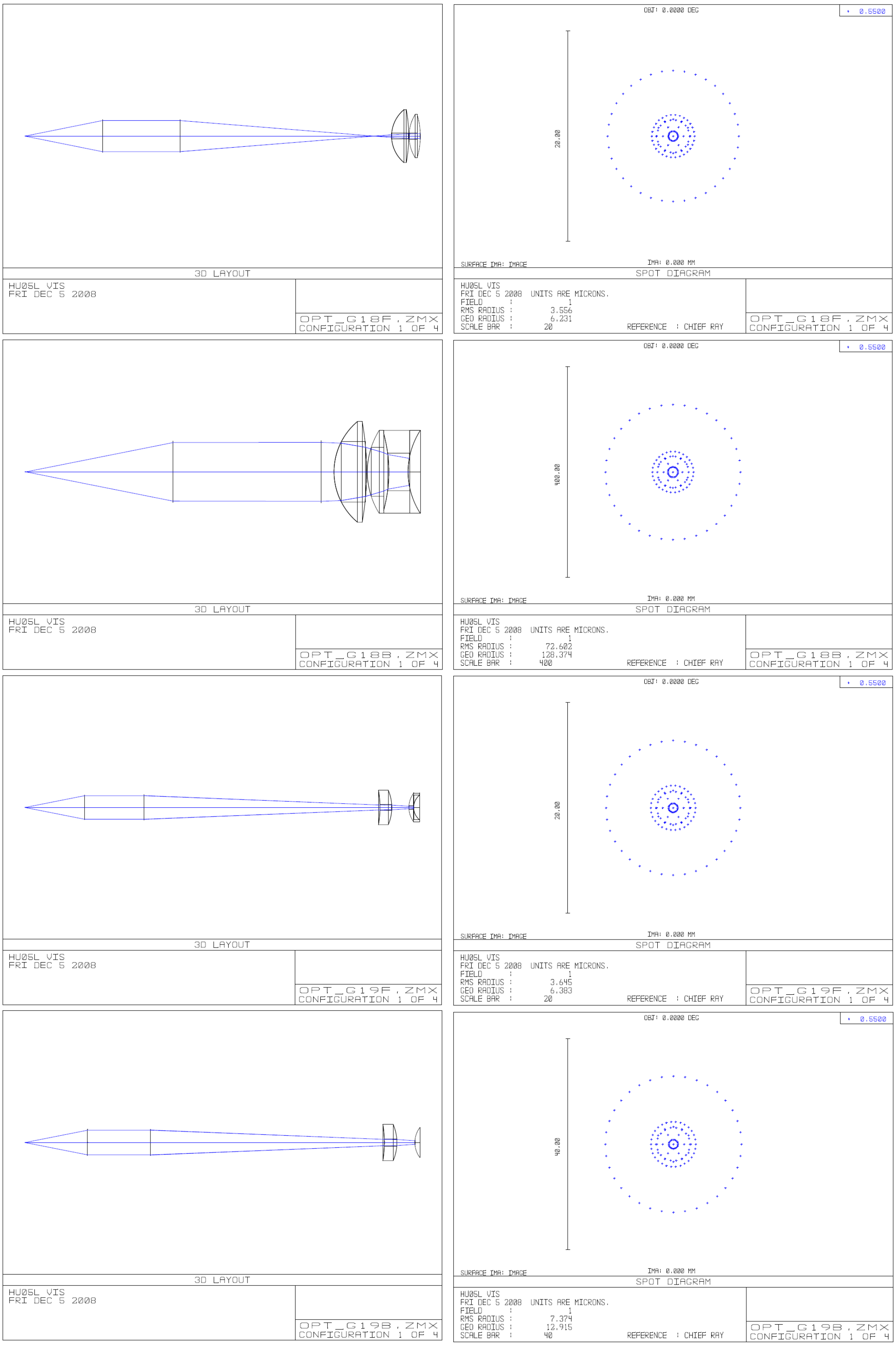


図 D.9: 可視カメラレンズ群 (G18,G19)

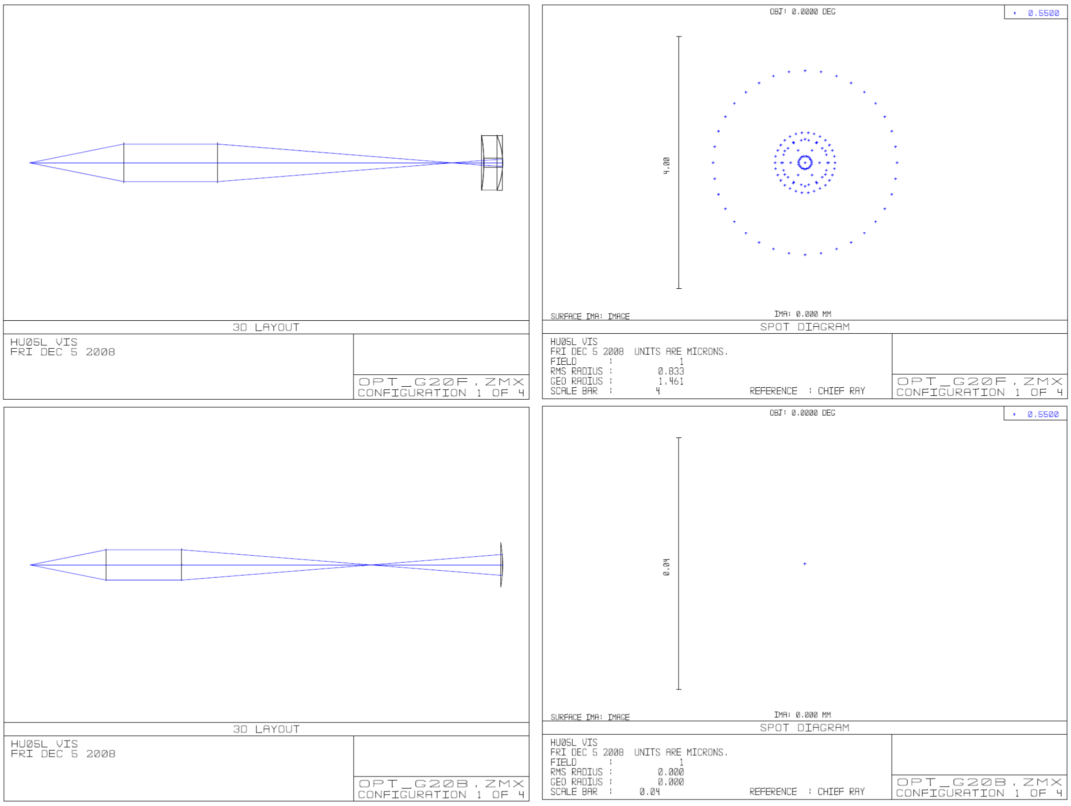


図 D.10: 可視カメラレンズ群 (G20)

付 録E　浜松ホトニクスで開発中の検出器

浜松ホトニクスでは、「可視赤外線カメラ」用に近赤外線検出器を開発中であり、将来的には、2k×2k フォーマット InGaAs 検出器を目指した検出器である。駆動試験は、国立天文台と広島大学が共同で行っており、現在までのところ 64×64 フォーマットマルチプレクサパッケージ (図 E.1) の駆動を確認した。今後のために、次頁に設定したクロックファイルを示し、図 E.2 に実際に送ったクロックの波形を示す。

図 E.1: 64×64 フォーマットマルチプレクサ

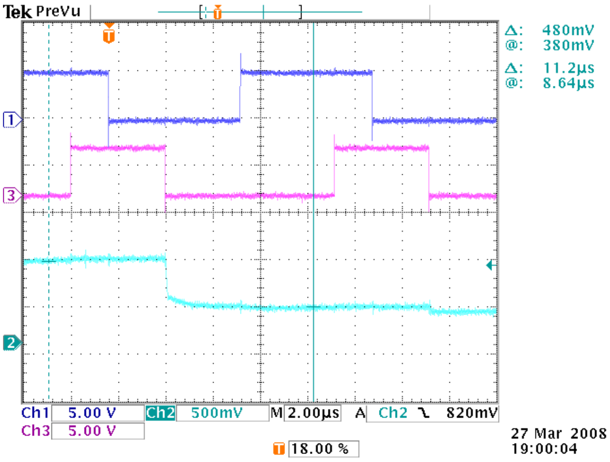


図 E.2: クロック波形

E.1 cpg.ascii

```
#################################################################

set_clock_tick 100  # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 10  # HPIR-reset


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   2   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   1  |  |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   1  |  |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
end

#################################################################


set_clock_tick 1    # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 11  # HPIR-reset_on


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   1   ] |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
end

#################################################################

set_clock_tick 10  # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 12  # HPIR-reset_off


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   1  |  |   ]  ] |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
end

#################################################################
```

```
set_clock_tick  5  # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 21  # HPIR-read-1gyou-1retsu


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   2  |  |  ]  ]  |  ]  ]  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  |  |  ]  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t  24  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  |  ]  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  |  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  |  |
t   5  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  ]  ]  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  ]  |
end

################################################################

set_clock_tick  5  # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 31  # HPIR-read-Nretsu


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   2  |  |  ]  ]  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  ]  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  |  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  |  |
t   5  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  ]  ]  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  |  |
t   1  |  |  ]  ]  |  |  ]  |  |  |  |  |  |  |  |  ]  ]  |
end

################################################################
```

```
set_clock_tick  5  # numebr of 100nsec clock ticks in one time bin
operation_type 41  # HPIR-read-Ngyou-1retsu


#      R  V  H  H  H  V  V  P  S  R  D  D  T  C  C  C  C  S
#      e  r  s  c  o  c  s  h  W  G  G  C  R  D  D  D  O  L
#      s  e  p  l  l  l  p  i           R  A  S  S  S  N  E
#      e  s     k  d  k     n              N  -  +  0  V  E
#      t  e        |        o                             P
#      |  t        g        r
#      a
#      l
#      l

start  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 15 16 17 18 19 29
t   2  |  |   ]  ] |   ]  ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ]  ] |   ]  ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ]  ] |  |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ]  ] |  |   ]  ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t  24  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ]  ]  ] |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  |   ]  ] |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |  |  |   ] |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |   ] |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |   ] |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |  |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |  |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |  |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ] |  |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   2  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
t   1  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |   ] |  |
t   5  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |   ]  ] |  |
t   1  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |   ] |  |
t   1  |  |   ]  ] |  |   ] |  |  |  |  |  |  |  |   ]  ] |
end

#################################################################
```

E.2 spv.ascii

```
# ------------------------------------------------------------ #
#                  Hamaphoto-IR operation                       #
# ------------------------------------------------------------ #


begin reset_on_hpir
ccd_operation 0 11 1
end

begin reset_off_hpir
ccd_operation 0 12 1
end

begin read_hpir
ccd_operation 0 21 1
ccd_operation 0 31 65
loop1_start 63
  ccd_operation 0 41 1
ccd_operation 0 31 65
loop1_continue
end


begin hpir_redundant
ccd_operation 0 41 1
        ccd_operation 0 31 8191
end

begin read_hpir_mugen
loop2_start 999999
ccd_operation 0 12 1
ccd_operation 0 21 1
ccd_operation 0 31 65
loop1_start 63
  ccd_operation 0 41 1
ccd_operation 0 31 65
loop1_continue
ccd_operation 0 11 1
loop2_continue
end
```

謝辞

まずこの 3 年間、常に厳しくそして常に熱心に指導下さった山下卓也先生に深い感謝を申し上げます。山下先生から学んだ多くのことは、これからの自分にとって財産になると確信しております。本当にありがとうございました。

国立天文台の中屋秀彦氏には検出器周りのあらゆることについて御指導下さいました。ファーストライトまでこぎ着けたのも中屋さんの力があったからこそです。ありがとうございました。

また、広島大学宇宙科学センターのみなさまにも御尽力いただきました。まず、川端先生にはカメラ開発中に様々な助言を頂きました。また、HOWPol の開発にも参加させていただきました。赤外線カメラのみならず可視カメラである HOWPol にも着手することができたため、様々な知識を得ることができました。本当にありがとうございました。植村先生には、カメラの取り付け等で御世話になりました。植村先生が様々な人から尊敬されているのは、その才能とあの性格からの結果なのだと思います。植村先生の人徳には本当に頭が下がります。ありがとうございました。磯貝さん (現:国立天文台) には開発の心構えを学ぶことができました。あの高速分光器を 1 年でファーストライトまでこぎ着けたことには本当に感服いたします。そして、「自分も頑張らなければ!」と奮い立たせることができました。ありがとうございました。

また、高エネ宇宙研のみなさまに感謝申し上げます。まず、大杉先生には大学 1 年からのチューターということもあり、大学+院時代の 6 年間、つまり人生の四半世紀にも及ぶ長い期間御世話になりました。大杉先生の風格を見習いたいと心から思っております。ありがとうございました。深沢先生には、セミナー等で御世話になりました。片桐さんには、ガンマ線実験の TA で御世話になりました。水野さんにおいては共に小部屋で過ごしているだけで楽しめました。そして、宇宙科学センターの助教となられたひろたかさん。この 3 年間、尾道から富士山まで様々なところに行きました。ひろたかさんの体力には驚きますが、ほどほどにしておいたほうが良いと思います。あと、素敵な出会いがあることを心より祈っております。ありがとうございました。

また、研究室のみなさんにも心よりお礼申し上げます。この 3 年間楽しむことができたのも、みなさんのおかげです。ありがとうございました。

最後に、こんな健康体に育ったのも両親のおかげです。まだまだダメな自分だけど、社会に出てもっと成長しなくちゃ、と思う毎日です。遠くから温かく見守っていてください。でっかくなってやります。(09 年 2 月 25 日に記す)

2 月 26 日から 3 月 11 日の 2 週間にわたる期間、我儘な失踪 (疾走?) を許してくれた皆様に感謝します。区切りを付けるという意味と本州を 1 周りして 1 回り大きくなるという意味で出た旅でしたが、そうやすやすといきませんね。あと 10 日で広島を去ることになるわけで、共に過ごしてきた仲間とも 10 日後にはなかなか会えなくなるのですが、この生活がまだまだ続くのではという錯覚にとらわれており、実感がなかなか湧かないものです。

最後に、同期の M2 の皆様に感謝申し上げます。まず、同じ小部屋のウメッキー、上原、シラポンさん。小部屋での生活を楽しむことが出来ました。特に、白さんとは 3 年間まるまる一緒に過ごし、さらにホッツ賀茂メンバーとしても活動してきました。ホント楽しかったです。ありがとうございました。次に、可視メンバーのマッフィー、田中 b、松井さん。解析やカメラの作業等で

御世話になりました。特に、マッフィーの意外な一面には驚かされました。なので、結構信頼しています。ありがとう。WPHC のメンバーである、ヨッシー、吉良氏。いろいろと遊んでくれたり、相談してくれたりとありがとう。ヨッシー、八方美人っぷりには首をかしげるところがありますが、親身に話を聞くところは〇だと思います。そして吉良さん、自分をハッキリ持っており、だからこそ芯のしっかり通った考え方と強い内面を持っている吉良さんのことを結構尊敬しています。二人とも本当にありがとう。最後に、ニッシー。いろいろとありがとな。何がありがとうかは敢えて言わんけどな。じゃあな!(09 年 3 月 19 日に記す)

参考文献

[1] Mayor and Queloz. 1995, Nature, 378, 355

[2] Charbonneau et al. 2000, Astrophys. J., 532, L55

[3] Watanabe et al. 2005, PASP, 117, 870

[4] The Extrasolar Planets Encyclopaedia , http://exoplanet.eu

[5] Charbonneau et al. 2002, Astrophys. J.,568, 377

[6] Charbonneau et al. 2005, Astrophys. J.,626, 523

[7] Sudarsky et al. 2003, Astrophys. J.,588, 1121

[8] Burrows et al. 2005, Astrophys. J.,625, L135

[9] Fortney et al. 2005, Astrophys. J.,627, L69

[10] Seager et al. 2005, Astrophys. J.,632, 1122

[11] Burrows et al. 2007, Astrophys. J., 688, L171

[12] Burrows et al. 2008, Astrophys. J., 678, 1436

[13] Burrows et al. 2006, Astrophys. J., 650, 1140

[14] Richardson et al. 2007, astro-ph/0702507v1

[15] Deming et al. 2005, astro-ph/0503554v1

[16] Knutson et al. 2008, Astrophys. J., 673, 526

[17] Rowe et al. 2006, Astrophys. J.,646, 1241

[18] Snellen 2005, Astron. Soc.,363, 211

[19] Fortney 2008, Astrophys. J., 678, 1419

[20] Deming 2008, Proceedings IAU Symposium, No. 253

[21] 2MASS All Sky Catalog of point sources, http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/

[22] Rathoen, VIRGO-2K 2048×2048 SWIR HgCdTe IRFPA Readout Model:SB-301 User's Guide and Operating Manual

[23] Ratheon, VIRGO-2K Module49

[24] George Rieke, Detection of Light From the Ultraviolet to the Submillimeter, Cambridge University Press 2002

[25] Steve B. Howell, Handbook of CCD Astronomy, Cambridge University Press 2000

[26] 美濃和陽典 「すばる IRCS 撮像データ解析マニュアル」

[27] (株) レンズ屋 「可視赤外カメラ (HU05) 設計報告書」 2006

[28] Portescap 「ターボディスク P430 マイクロステッピング用ステッピングモータ」

[29] 日本パルスモータ社 「Motionnet ってなんですか?」2004

[30] 日本パルスモータ社 「センターボード (PCI)PPCI-L112 取扱説明書」 2005

[31] 日本パルスモータ社 「センターボード (PCI)PPCI-L112 ローレベル DLL サンプル取扱説明書」 2005

[32] 日本パルスモータ社 「ローカル 1 軸ステッピングモータドライバ MNET-BCD4020FB」 2006

[33] 日本パルスモータ社 「Motionnet DLL リファレンス」2006

[34] オムロン 「形 SS 極超小形基本スイッチ」

[35] ATMEL, 8-bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flash ATmega8/ATmega8L

[36] 山根彰 「AVR マイコン・リファレンス・ブック」 CQ 出版社 2006

[37] 土井滋貴 「試しながら学ぶ AVR 入門」 CQ 出版社 2008

[38] Lakeshore, User's Manual Model 331 Temperature Controller

[39] Lakeshore, User's Manual Model 218 Temperature Monitor

[40] (株) リーディンテックス 「光学設計ソフト ZEMAX でだれでもできるレンズ設計」

[41] 小林俊一 「低温の物理」 東京大学出版会 1977

[42] 堀越源一 「真空技術」 東京大学出版会 1976

[43] シリーズ現代の天文学 第 15 巻「宇宙の観測 I ―光・赤外天文学」 日本評論社 2007

[44] 浜松ホトニクス 「64×64 2D センサ仕様書 (案)」

[45] 千代延真吾 「広島大学 1.5m 望遠鏡移設地シーイングのモニター装置開発と測定」 広島大学卒業論文 2005

[46] 千代延真吾 「かなた望遠鏡用 1 露出型偏光撮像装置 HOWPol の筐体及び駆動機構の開発」 広島大学 修士論文 2007

[47] 中屋秀彦 「2 次元アレイデータ取得システムと CCD カメラの開発」 名古屋大学 Z 研 修士論文 1996

[48] 永山貴宏 「近赤外線掃天観測施設 IRSF の開発と銀河面に隠された銀河団の調査」 名古屋大学 Z 研　博士論文　2004

[49] 長嶋千恵 「近赤外 3 色同時サーベイ用カメラ SIRIUS の開発と SIRIUS によるプレアデス星団の褐色矮星探査」名古屋大学 Z 研 博士論文 2003

[50] 渡邊誠 「可視近赤外同時撮像分光装置 TRISPEC の開発と 2 型 Seyfert 銀河の偏光分光観測」名古屋大学 Z 研 博士論文 2003

[51] 谷津陽一 「ガンマ線バースト観測用 50cm 望遠鏡の性能評価と改良」 東京工業大学 修士論文 2005

[52] 宮本久嗣 「かなた望遠鏡観測装置に用いる近赤外線検出器のマルチプレクサ駆動試験」 広島大学 卒業論文 2007